

PROF. DR.-ING. F. S. ROSTASY

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

Lehrstuhl für Baustoffkunde und Stahlbetonbau

30-0111/3-001

TECHNISCHE UNIVERSITÄT

BRAUNSCHWEIG

3300 Braunschweig, den 14.02.1985

KONSTITUTIVES STOFFGESETZ DES VERBUNDVERHALTENS VON
EINBETONIERTEM BEWEHRUNGSSTAHL

Arbeitsbericht III

Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostasy

Dipl.-Ing. A. Rohling

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft
Stoffgesetze im konstruktiven Ingenieurbau

Postsendungen:
3300 Braunschweig, Beethovenstraße 52
Fernschreiber: 8 52 698 ibstb d

Erfüllungsort und Gerichtsstand Braunschweig

Fernsprecher:
391 5421
Ortskennzahl 0531
Kommt keine Verbindung zustande
bitte 391 5431 wählen

Besuchszeiten:
Montag bis Freitag 8 - 16 Uhr

EINLEITUNG

Die Bemessung von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen erfordert neben der Kenntnis der Materialeigenschaften der Einzelbaustoffe Stahl und Beton auch die Kenntnis der Verbundwirkung zwischen beiden Stoffen. Das Verbundverhalten bestimmt neben dem Tragverhalten auch das Verformungsverhalten einer Konstruktion, deren Rißbildung und Dauerhaftigkeit. Wegen dieser fundamentalen Bedeutung des Verbundes wird seit Beginn der Stahlbetonbauweise eine intensive Forschung betrieben.

Trotz dieser Forschungsaktivitäten ist eine umfassende Beschreibung des Verbundverhaltens bislang nicht gelungen. Da eine Literaturstudie gezeigt hatte, daß der Einfluß einer langzeitigen statischen sowie einer zyklischen Beanspruchung auf das Verbundverhalten im wesentlichen ungeklärt ist, wurde eine umfassende experimentelle Untersuchung durchgeführt. Die Versuchsergebnisse werden in Teil I "Verbundkriechversuche unter konstanter Dauerlast" und Teil II "Verbundkriechversuche unter zyklischer Schwellbeanspruchung" dieses Arbeitsberichtes mitgeteilt.

Das in Versuchen ermittelte Verhalten wird in Form von Verbundspannungs-Verschiebungsbeziehungen (Stoffgesetz des Verbundes) $\tau_v = f(v, t)$ und $\tau_v = f(v, N)$ angegeben. Bedingt durch unterschiedliche geometrische Verhältnisse der Versuchskörper, stark streuende Materialgrößen u.a.m. zeigen die gemessenen τ_v -v-Beziehungen große Unterschiede, die die Vergleichbarkeit der Beziehungen untereinander sowie deren Übertragbarkeit auf das tatsächliche Bauteilverhalten erschweren. Die Erarbeitung eines allgemeingültigen Verbundgesetzes wird auch durch die phänomenologische Vorgehensweise erschwert, d.h. die physikalisch-mechanische Natur des Verbundes (Entstehung, Wirkung und Ausbreitung innerer Risse) wird nicht erfaßt. Um diese Problematik zu untersuchen ist geplant, die innere Rißbildung in Abhängigkeit von Beanspruchungszustand und Versuchs-

körper zu studieren. Ein erster Schritt dazu ist die Entwicklung einer geeigneten Methode zur Sichtbarmachung der inneren Ribbildung. Über diese Versuche wird in Teil III dieser Arbeit berichtet.

TEIL I

Verbundkriechversuche unter konstanter Dauerlast

TEIL I

Verbundkriechversuche unter konstanter Dauerlast

1. Versuchsprogramm
2. Ausbildung und Herstellung der Versuchskörper
3. Baustoffe
 - 3.1 Bewehrungsstahl
 - 3.2 Beton
4. Versuchseinrichtung und Versuchsdurchführung
5. Kurzzeitversuche
6. Ergebnisse der Verbundkriechversuche unter konstanter Dauerlast
 - 6.1 Einfluß der Belastungshöhe
 - 6.2 Einfluß der Betongüte
 - 6.3 Einfluß des Belastungsalters
 - 6.4 Einfluß der Zementart
 - 6.5 Einfluß der bezogenen Rippenfläche
 - 6.6 Einfluß der Betondeckung
 - 6.7 Mehrstufenbelastungen
 - 6.8 Versuche zur Ermittlung der Dauerstandfestigkeit des Verbundes
7. Verhalten der Versuchskörper nach statischer Dauerbeanspruchung
8. Zusammenfassung der Versuchsergebnisse
9. Nachrechnung von Versuchsergebnissen mit bekannten Ansätzen für die Kriechfunktion $\varphi_V(t)$
10. Offene Fragen

1. VERSUCHSPROGRAMM

Das Versuchsprogramm der Verbundkriechuntersuchungen unter konstanter Dauerlast sah die Variation folgender Parameter vor:

- Belastungshöhe (Einstufenversuch)
- Betongüte
- bezogene Rippenfläche
- Belastungsalter
- Betondeckung
- Änderung der Belastungshöhe (Mehrstufenversuch)

Die Versuchskörper für die Verbundkriechuntersuchungen unter konstanter Dauerlast bzw. zyklischer Zugschwellbeanspruchung (siehe Teil II dieses Berichtes) wurden in Serien gefertigt und mit AKZ1 bis AKZ25 (zylindrischer Ausziehkörper mit zentrischem Bewehrungsstab) bzw. AKE1 bis AKE10 (quadratischer Ausziehkörper mit in der Regel exzentrischer Stablage) bezeichnet. Eine Serie AKZ besteht aus jeweils 20, eine Serie AKE aus jeweils 21 oder 28 Versuchskörpern.

In Anlage 1 sind die bei den einzelnen Serien variierten Parameter für die Dauerstandversuche zusammengestellt. Um Nacherhärtungseinflüsse auszuschalten, wurden die Versuchskörper mit Ausnahme der Serien AKZ8, AKZ9, und AKZ19 in einem Alter $t_0 \geq 90$ Tage belastet.

Bei den Serien AKZ9 und AKZ15 wurde statt des sonst verwendeten Zementes PZ 35F ein Hochofenzement H0Z 35 gewählt.

Die Zusammenstellung in Anlage 1 enthält sämtliche am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz durchgeführte Verbundkriechuntersuchungen. Sie enthält auch bereits vor Beginn des DFG-Projektes - ohne Förderung durch fremde Stellen - in Eigenfinanzierung durchgeführte Untersuchungen.

Mit Ausnahme der Dauerstandversuche der Serie AKZ22 sowie teilweise der Serien AKE2 und AKE4 ist die Durchführung des Versuchsprogramms abgeschlossen. Die noch ausstehenden Untersuchungen werden nach Ablauf der zur Zeit laufenden Förderperiode (bis August 1985) abgeschlossen sein.

2. AUSBILDUNG UND HERSTELLUNG DER VERSUCHSKÖRPER

Die Verbundkriechuntersuchungen erfolgten an unbewehrten zylindrischen Ausziehkörpern mit zentrischem Bewehrungsstab (Serien AKZ) sowie an unbewehrten quadratischen Ausziehkörpern mit zentrischer bzw. exzentrischer Stablage (Serien AKE).

Die Abmessungen der Ausziehkörper wurden in Anlehnung an die RILEM/CEB/FIP-Empfehlungen /1/ wie folgt festgelegt:

- Zylindrische Ausziehkörper

Verbundlänge $l_v = 5 d_s = 80 \text{ mm}$; $d_s = 16 \text{ mm}$

Verbundfreie Vorlänge $l = l_v = 5 d_s = 80 \text{ mm}$

Verbundfreie Nachlänge $l = 2 d_s = 32 \text{ mm}$

Probenhöhe $h = 12 d_s = 192 \text{ mm}$

Probendurchmesser $D = 10 d_s = 160 \text{ mm}$

- Quadratische Ausziehkörper

Verbundlänge $l_v = 5 d_s = 80 \text{ mm}$; $d_s = 16 \text{ mm}$

Verbundfreie Vorlänge $l = l_v = 5 d_s = 80 \text{ mm}$

Verbundfreie Nachlänge $l = 2,5 d_s = 40 \text{ mm}$

Kantenlänge des Probekörpers $a = 12,5 d_s = 200 \text{ mm}$

Die Probekörper sind in Anlage 2 abgebildet.

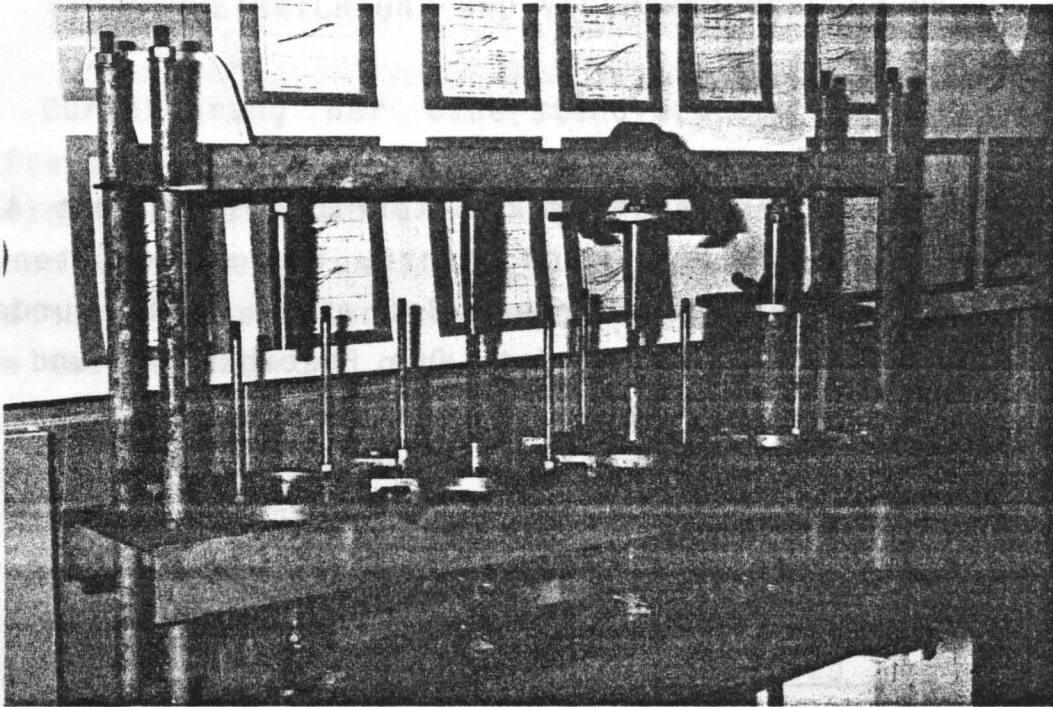
Bei einigen Serien wurde die Verbundlänge unter Beibehaltung der verbundfreien Vorlänge von $l = 5 d_s = 80 \text{ mm}$ auf $l_v = 3 d_s = 48 \text{ mm}$ reduziert.

Zur Herstellung der Ausziehkörper wurden vorhandene Schaltische benutzt. Der Bewehrungsstab wird am oberen unbelasteten Ende mit einer Zentrierbohrung versehen, in die ein kegelförmig angeschliffener Zentrierstab greift. An der unteren Seite wird der Stahlstab mit Hilfe eines Zentrierringes und durch Klemmschrauben gehalten.

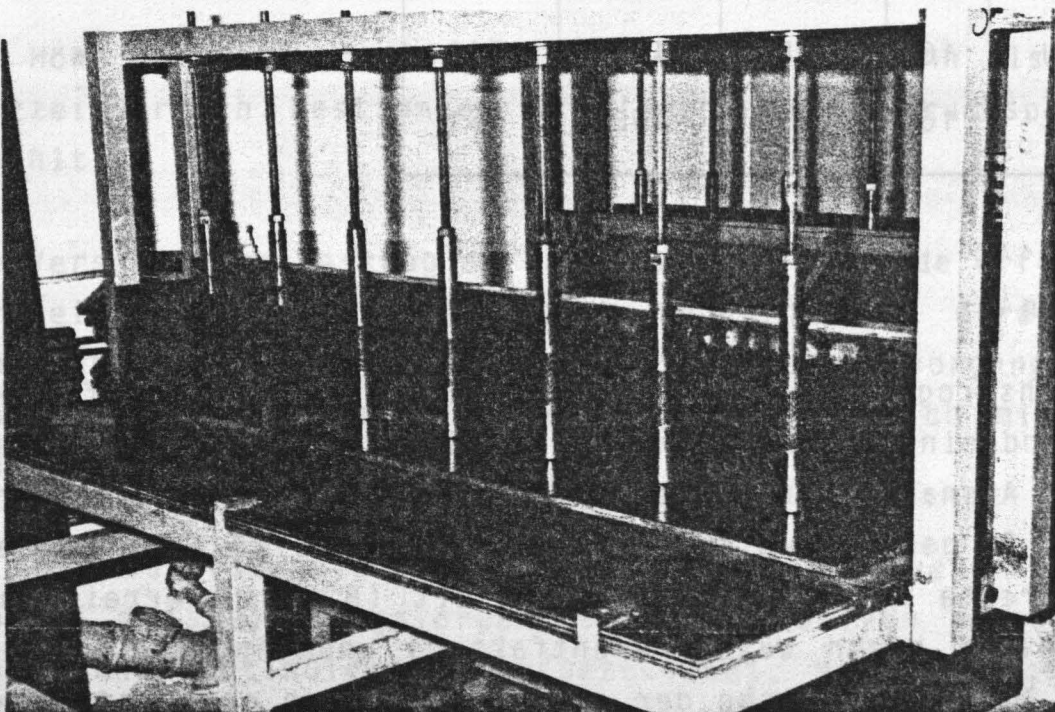
Bei der Schalung für die zylindrischen Ausziehkörper ist die Zentrierereinrichtung unverschieblich, bei der Schalung für die quadratischen Ausziehkörper dagegen verschieblich auf einer Führungsschiene im Stahlrahmen befestigt, so daß die Betondeckung beliebig einstellbar ist. Die Abgrenzung der Verbundlänge erfolgt über zwei Stahlrohre, deren Enden gegen das Eindringen von Beton mit einem dauerelastischen Kitt verschlossen werden. Das obere Stahlrohr wird auf den Zentrierstab gedreht, das untere Stahlrohr durch Klemmschrauben am Stahlstab befestigt. Dadurch ist eine variable Einstellung der verbundfreien Vor- und Nachlänge gewährleistet. Als Schalung für die zylindrischen Ausziehkörper dienen in Längsrichtung aufgeschnittene Kunststoffrohre, die zwischen einer auf den Stahlrahmen aufgeschraubten Stahlplatte und einem Stahlring gehalten werden, der über zwei Gewindestangen mit der Stahlplatte verbunden ist. Die Schalungen für die quadratischen Ausziehkörper bestehen aus verschraubbaren Holzteilen.

Die Versuchskörper werden stehend betoniert; die Belastungsrichtung entspricht der Betonierrichtung. Die Verdichtung erfolgt mit Innenrüttlern, wobei ein Berühren der Rüttelflasche mit dem Stahlstab vermieden wird. Nach dem Betonieren werden die Prüfkörper sieben Tage feucht gehalten, anschließend ausgeschalt und bis zu Versuchsbeginn in einem Klimaraum bei $\vartheta = 20^{\circ}\text{C}$ und 65 % rel. Luftfeuchte gelagert.

Zu jeder Prüfkörperserie werden gleichzeitig mindestens 6 Probewürfel ($15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$) und 3 Zylinder ($d = 15 \text{ cm}$, $h = 30 \text{ cm}$) unter den gleichen Bedingungen hergestellt und gelagert. An diesen Begleitkörpern wird nach 28 Tagen bzw. zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung die Betondruck- und Betonspaltzugfestigkeit bestimmt.



Schaltisch zur Herstellung der zentrischen Ausziehkörper



Schaltisch zur Herstellung der exzentrischen Ausziehkörper

3. BAUSTOFFE

3.1 Bewehrungsstahl

Die Versuche wurden überwiegend mit Betonrippenstahl BSt 420/500 RU, Durchmesser $d_s = 16$ mm, durchgeführt. Die verwendeten Stäbe stammen aus 3 verschiedenen Chargen. Bei einer Serie wurde Rippentorstahl BSt 420/500 RK verwendet. Die Festigkeits- und Profilierungskennwerte sind in Tabelle 3.1 zusammengestellt.

Tabelle 3.1: Bezogene Rippenfläche und Festigkeitskennwerte der verwendeten Bewehrungsstähle

Stahlsorte	d_s mm	f_R -	β_s N/mm ²	β_z N/mm ²
BSt III U	16	0,065	438	635
BSt III U	16	0,072	492	692
BSt III U	16	0,082	490	710
BSt III K	16	0,095	462	561

3.2 • Beton

Das Versuchsprogramm sah die Untersuchung eines niederfesten Betons B25 und eines hochfesten Betons B55 vor. Zur Betonherstellung wurde, mit Ausnahme der Serien AKZ9 und AKZ15, bei denen Hochofenzement H0Z 35 gewählt wurde, Portlandzement PZ 35 F verwendet. Um die angestrebte niedrige Betonfestigkeit (B25) zu erreichen, war die Wahl eines hohen Wasserzementfaktors unumgänglich. Die Sieblinie der Zuschlaggemische der einzelnen Serien entsprach etwa der Sieblinie B16 nach DIN 1045. Die Betonzusammensetzungen sind in Anlage 3 angegeben. Die Festigkeitskennwerte sind in Anlage 4 zusammengestellt.

4. VERSUCHSEINRICHTUNG UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Zur Durchführung der Dauerstandversuche wurde ein vorhandener Prüfrahmen so umgebaut, daß insgesamt 6 Prüfkörper unabhängig voneinander belastet und langfristig unter Last gehalten werden können. Der Bewehrungsstab wird durch die Innenbohrung der zur Belastung verwendeten Lukas-Hohlkolbenzylinder geführt und durch eine Keilverankerung gehalten. Jeder Einzelprüfstand ist zur Konstanthaltung des Öldrucks bzw. zum Druckausgleich bei geringem Ölverlust mit einem Druckspeicher ausgestattet. Die Prüfeinrichtung ist in Anlage 5 abgebildet.

Von jeder Serie wurden zunächst mindestens 3 Kurzzeitversuche durchgeführt. Aus den aufgebrachten Lasten wurden die Verbundspannungen unter Annahme einer gleichmäßigen Verteilung über die Verbundlänge berechnet:

$$\tau_v = \frac{F}{u_s \cdot l_v} \quad (4.1)$$

Die Höhe der Verbundkriechspannung τ_{vd} wurde dann als Teil der im Kurzzeitversuch bestimmten mittleren Verbundbruchspannung τ_{vum} gewählt.

Die Verschiebungsmessung am unbelasteten Stabende erfolgte bei den Kurzzeitversuchen über induktive Wegaufnehmer, deren Taster auf den Stabenden aufsaßen. Während des Belastungsvorgangs wurden die Kraft und die Stabendverschiebung kontinuierlich mit einem x-y-Schreiber aufgezeichnet.

Bei den Dauerstandversuchen wurde die Stabendverschiebung i.d.R. während des Belastungsvorganges mit induktiven Wegaufnehmern gemessen und kontinuierlich aufgezeichnet. Nach Erreichen der vorgegebenen Dauerspannung wurde die Verschiebungsentwicklung während der ersten Stunden mit einem x-y-t-Schreiber aufgezeichnet. Die Wegaufnehmer wurden dann durch mechanische Feinmeßuhren mit einer

Ablesegenauigkeit von $1/1000$ mm ausgetauscht, die in größeren Zeitabständen abgelesen wurden. Zur Ermittlung der Rückverformung nach Entlastung, wurden bei einigen Versuchskörpern nach einer Belastungszeit von etwa 2 bis 3 Monaten (1500 - 2200 h) die Feinmeßuhren wieder durch induktive Wegaufnehmer ersetzt. Somit konnte der spontan elastische sowie der verzögert elastische Rückschlupf kontinuierlich ermittelt werden.

Nach Beendigung der Dauerstandversuche wurden alle Versuchskörper, die während der Belastungsdauer nicht versagt hatten, zur Ermittlung der Resttragkraft einer Kurzzeitbeanspruchung unterworfen.

Anschließend wurde jeder Ausziehkörper gespalten und auf Unregelmäßigkeiten im Verbundbereich (z.B. Lunker) überprüft. Zusätzlich wurde die Verbundlänge nachgemessen.

5. KURZZEITVERSUCHE

Zu Versuchsbeginn wurden zunächst von jeder Serie i.d.R. 3 Kurzzeitversuche durchgeführt. Die Höhe der Dauerspannung in den Dauerstandversuchen wurde dann als Teil der mittleren Verbundfestigkeit festgelegt.

In den Anlagen 6 und 7 sind die nach Gleichung 4.1 berechneten Verbundbruchspannungen τ_{vu} angegeben. Aus der Tabelle sind auch die bezogenen Verbundfestigkeiten τ_{vu}/β_w zu entnehmen, wobei die Würfeldruckfestigkeiten bei Versuchsbeginn angesetzt wurden.

Das Versagen der zylindrischen Versuchskörper aus niederfestem Beton erfolgte stets durch Gleitbruch (Stabauszug bei fallender Kraft). Die Ausziehkörper aus hochfestem Beton - mit Ausnahme der in jungem Alter belasteten Proben - versagten i.d.R. durch Sprengbruch. Die quadratischen Ausziehkörper mit exzentrischer Stablage zeigten ebenfalls immer Sprengbrüche. Typische Bruchbilder sind in Anlage 8 zusammengestellt. Bei den Versuchskörpern mit auf der Mittelachse angeordnetem Stahlstab zeigten sich lotrechte, zur Stabachse parallele Betonrisse, während bei den auf der Diagonalen angeordneten Stäben i.d.R. die gesamte Körperecke abgesprengt wurde. Bild 5.1 zeigt den Abfall der Verbundfestigkeiten mit zunehmender exzentrischer Stablage. Sager /2/ hat einen Einfluß der Betondeckung auf die Verbundfestigkeit erst ab $c \approx 3 d_s$ festgestellt. Dies wurde bei der Darstellung in Bild 5.1 berücksichtigt. Der Vergleich der τ_v -v-Beziehungen in den Bildern 5.2 und 5.3 macht deutlich, daß mit den Verbundfestigkeiten auch die zugehörigen Verschiebungen mit geringer werdender Betondeckung abnehmen. Die Versagensart geht vom Gleitbruch (G) zum Sprengbruch (Sp) über.

Auf eine weitere Auswertung der Kurzzeitversuche soll hier verzichtet werden.

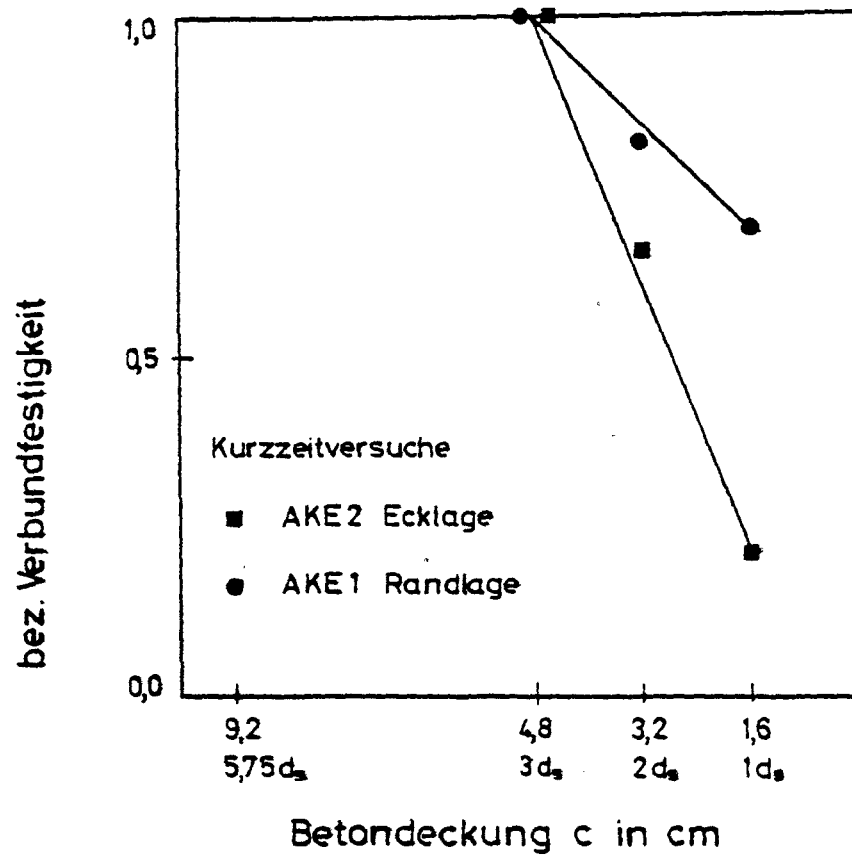


Bild 5.1 Abfall der Verbundfestigkeit bei exzentrischer Stablage im Vergleich zur zentrischen Stablage

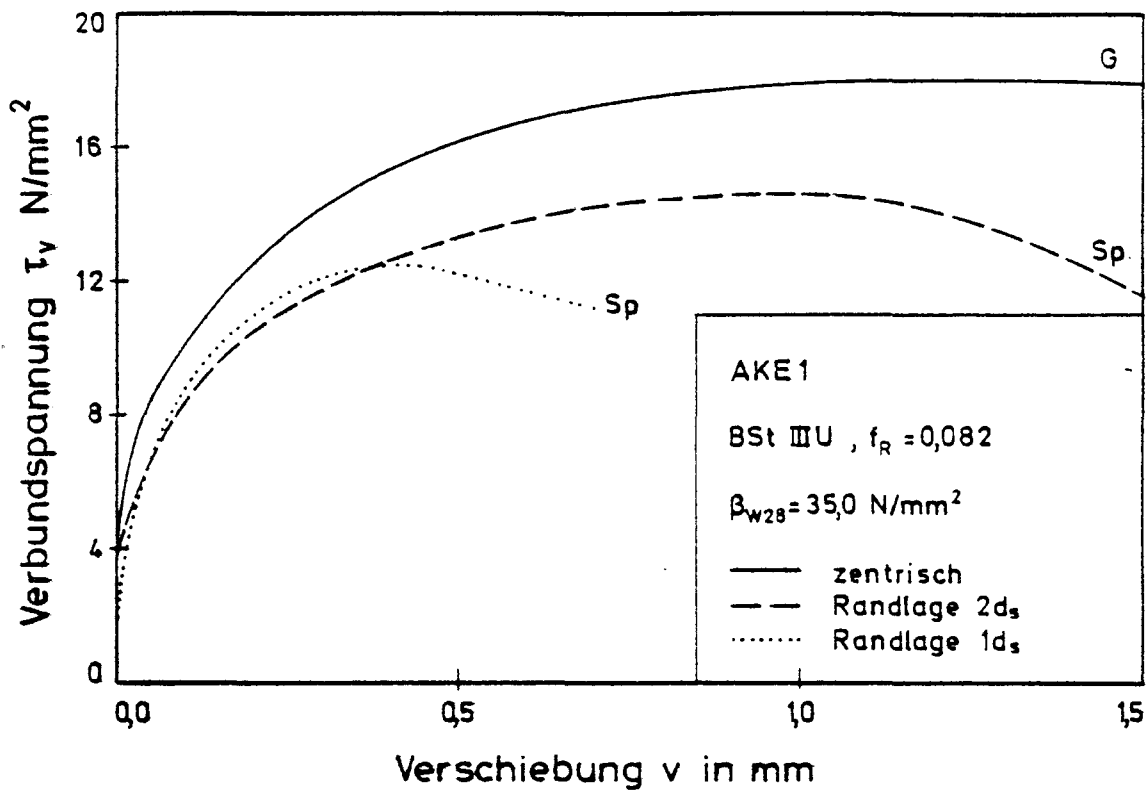


Bild 5.2 τ_v - v -Beziehung der Versuchskörper der Serie AKE1 bei verschiedener Stablage

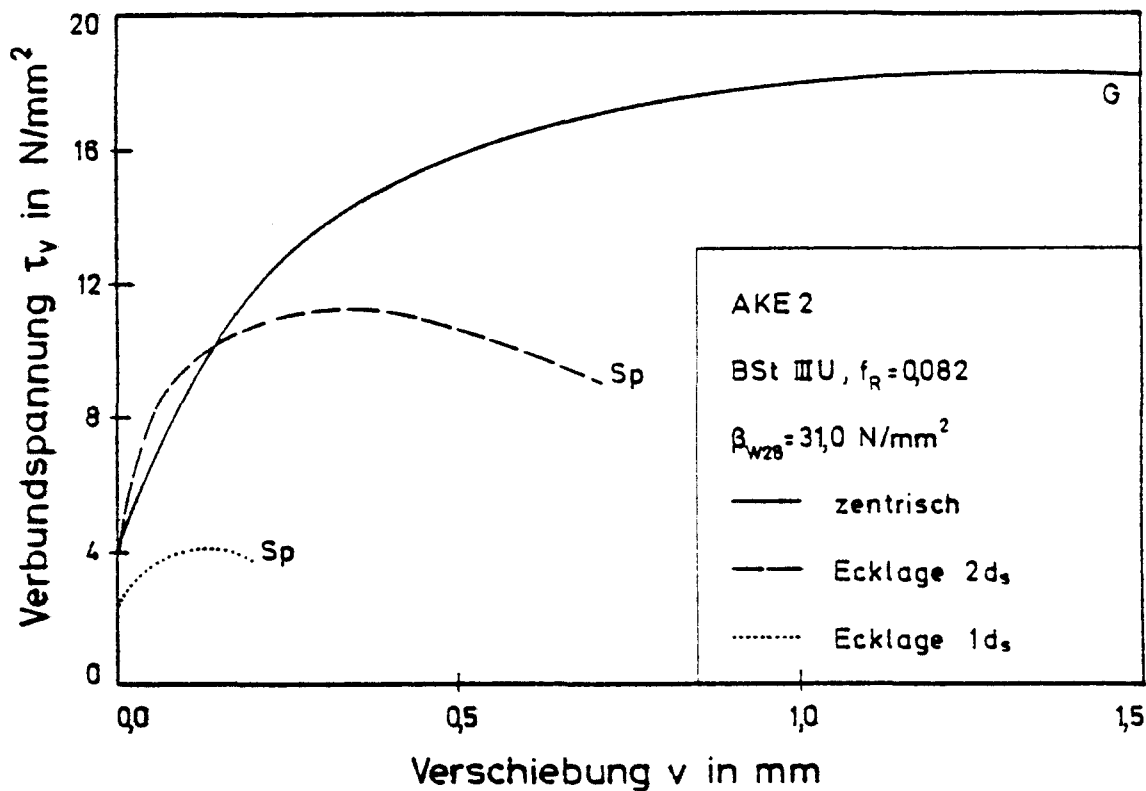


Bild 5.3 τ_v - v -Beziehung der Versuchskörper der Serie AKE2 bei verschiedener Stablage

6. ERGEBNISSE DER VERBUNDKRIECHVERSUCHE UNTER KONSTANTER DAUERLAST

Führt man einen Verbundkriechversuch durch, so stellt sich bei Erreichen der Verbunddauerspannung die spontane Verschiebung v_0 ein. Danach anschließend beobachtet man die zeitabhängige Verschiebungszunahme $v_k(t)$. In Bild 6.1 ist das im Versuch beobachtete Verbundkriechverhalten schematisch dargestellt.

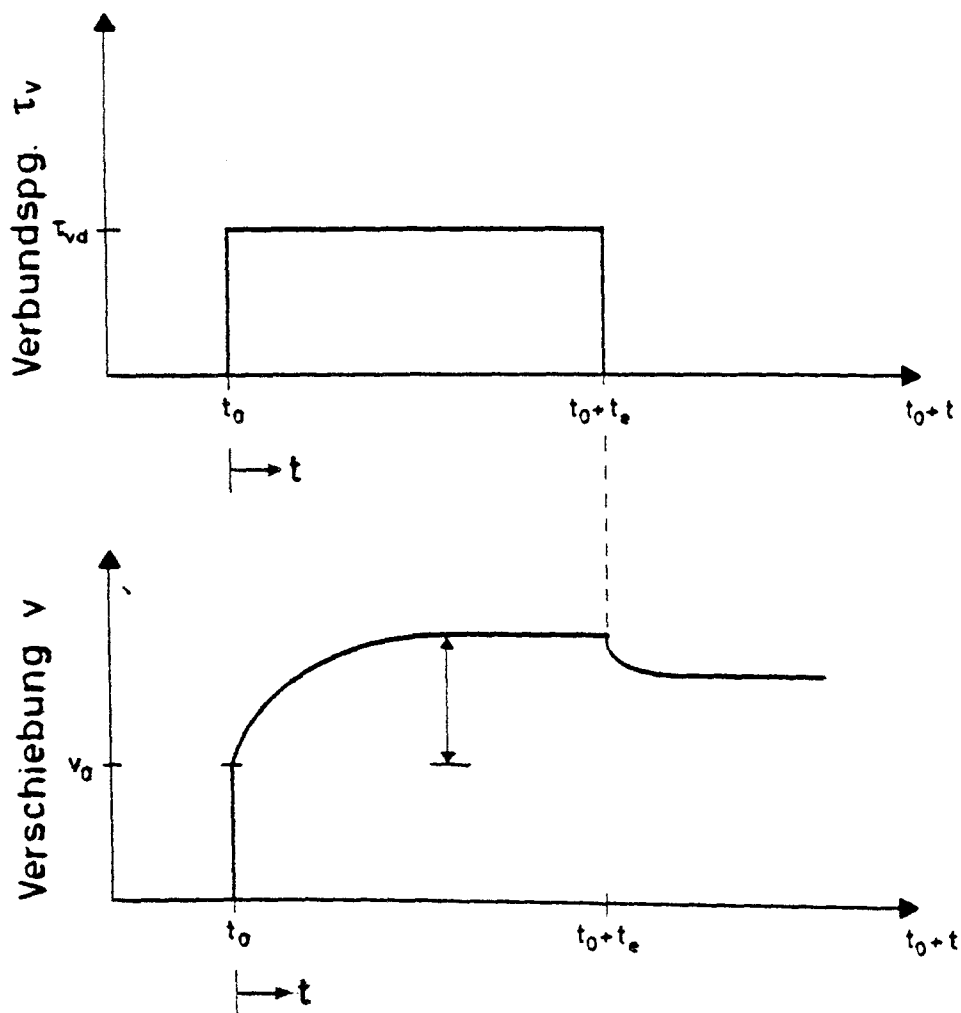


Bild 6.1 Grundsätzliches Verbundkriechverhalten im Versuch

Die Gesamtverschiebung ab dem Belastungsalter t_0 ergibt sich damit zu:

$$v(t) = v_0 + v_k(t) \quad (6.1)$$

Dabei wird vorausgesetzt, daß die Belastungshöhe unterhalb der Dauerstandfestigkeit des Verbundes ist, d.h. es liegt sog. primäres Kriechen vor.

In den Anlagen 9 bis 58 sind die $v(t)$ - t -Beziehungen aller Dauerstandversuche im doppellogarithmischen Maßstab aufgetragen. Ebenso wie nach den Ergebnissen von Franke /3/ und Svensvik /4/ ergibt sich in dieser Darstellungsweise in erster Näherung ein linearer Verlauf der $v(t)$ - t -Kurven.

Der von der Zeit t unter Dauerlast abhängige Verschiebungsverlauf entspricht etwa den bekannten Gesetzen des Betondruckkriechens. Für das Kriechen des unbewehrten zentrisch gedrückten Betons gilt, daß die Kriechverformung im Gebrauchsspannungsbereich $\sigma_d \leq 0,4 \beta_p$ proportional zur aufgebrachten Spannung und damit auch proportional zur elastischen Verformung ϵ_{el} ist. Die Gesamtverformung kann daher mit Hilfe einer Kriechzahl $\varphi(t)$ in der linearen Form

$$\epsilon_{ges}(t) = \epsilon_{el} + \epsilon_k(t) = \epsilon_{el} [1 + \varphi(t)] \quad (6.2)$$

ausgedrückt werden.

Überträgt man die lineare Kriechformel für das Betondruckkriechen auf das Verbundkriechen, ergibt sich die Gesamtverschiebung unter Dauerlast zu

$$v(t) = v_0 + v_k(t) = v_0 [1 + \varphi_v(t)] \quad (6.3)$$

Die Verbundkriechzahl $\varphi_v(t)$ gibt dabei das Verhältnis von zeitabhängiger zu spontaner Verschiebung an:

$$\varphi_v(t) = \frac{v(t) - v_0}{v_0} = \frac{v_k(t)}{v_0}.$$

In den Anlagen 59 bis 108 sind die $\varphi_v(t)$ - t -Verläufe für alle Versuche ebenfalls im doppellogarithmischen Maßstab dargestellt. Sämtliche Darstellungen der Anlagen 9 bis 108 wurden mit Hilfe einer EDV-Anlage erstellt.

Die Gültigkeit von Gleichung 6.3 setzt voraus, daß ein linearer Zusammenhang zwischen Kriechverformung und aufgebrachter Verbunddauerspannung besteht. Die Kriechzahl $\varphi_v(t)$ muß für Versuche mit unterschiedlichem Spannungsniveau, ansonsten jedoch gleicher Ausführung zu jedem Zeitpunkt t_i identisch sein. Die Annahme einer von der Beanspruchungshöhe unabhängigen Kriechfunktion $\varphi_v(t)$ muß anhand der Versuchsergebnisse noch überprüft werden.

In den folgenden Abschnitten wird der Einfluß der Versuchsparameter auf das Verbundkriechen diskutiert. Um Versuchsergebnisse vergleichen zu können, wurde die Steigung A der im doppellogarithmischen Maßstab näherungsweise linear verlaufenden $v(t)$ -t-Kurven ab $t = 0,1$ h ermittelt.

6.1 Einfluß der Belastungshöhe

Wie aus der Zusammenstellung der Versuchsparameter hervorgeht, wurde der Beanspruchungsgrad τ_{vd}/τ_{vu} in weiten Grenzen von 0,31 bis 0,96 variiert. Betrachtet man zunächst nur Lastniveaus $\tau_{vd}/\tau_{vu} \leq 0,7$, so verlaufen die $v(t)$ -t-Beziehungen - wie bereits von Fanke /3/ und Svensvik /4/ festgestellt - in doppellogarithmischer Darstellungsweise in erster Näherung linear. In den Anlagen 109 bis 111 wird die zeitliche Entwicklung der Endverschiebung von Versuchskörpern einer Serie für verschiedene Lastniveaus verglichen. Es zeigt sich, daß die zu unterschiedlichen Belastungshöhen gehörenden $v(t)$ -t-Kurven annähernd parallel zueinander verlaufen. Aus der Darstellung ist auch die Abhängigkeit der spontanen Anfangsverschiebung v_0 vom Belastungsgrad ablesbar.

Die Gültigkeit von Gleichung 6.3 setzt, wie bereits erwähnt, die Proportionalität der gesamten Verbundverschiebung (und damit auch des Kriechanteils) von der Dauerspannung voraus. Voraussetzung hierin ist die Existenz einer τ_v - v_0 -Linie zum Zeitpunkt $(0, t_0)$, die die Elastizität repräsentiert, aber nicht notwendigerweise eine linear-elastische. Nun ist aber bekannt, daß die τ_v - v_0 -Linie

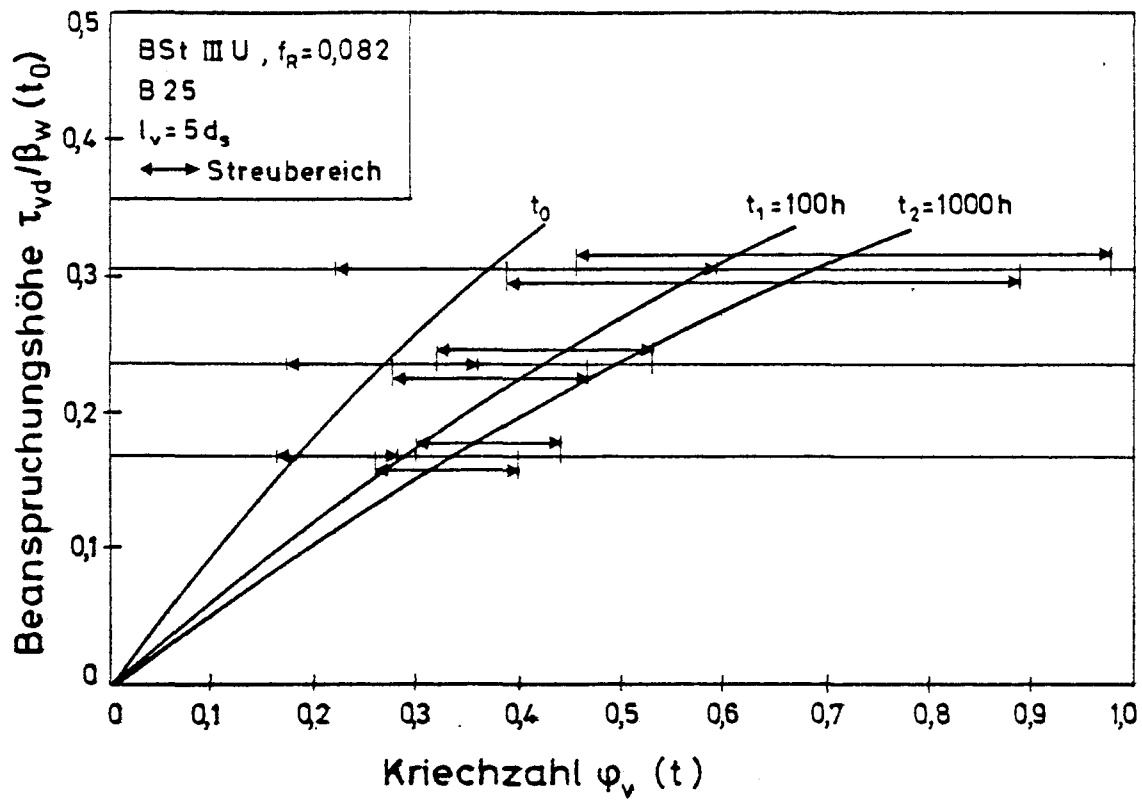


Bild 6.2 Isochronenbild für Beton B25

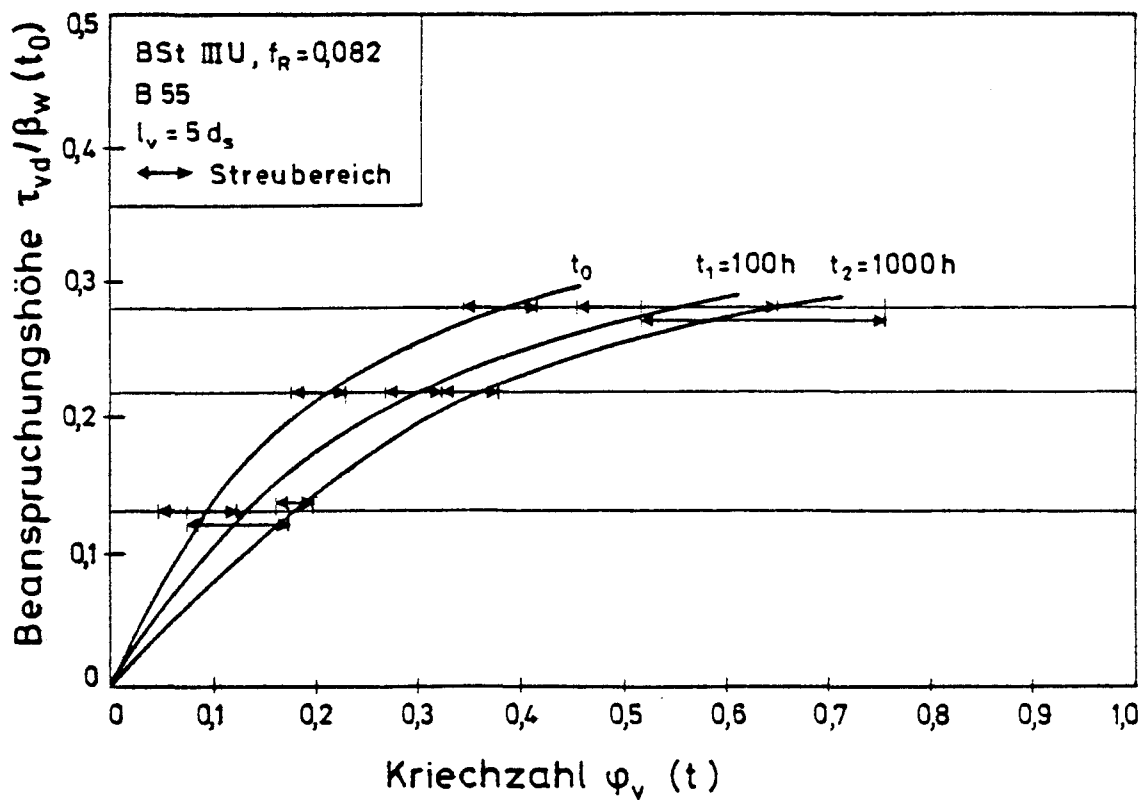


Bild 6.3 Isochronenbild für Beton B55

weder linear noch elastisch ist. Trotz dieser ersten Verletzung der Voraussetzungen für ein lineares Verbundkriechen wurden in den Bildern 6.2 und 6.3 die Isochronen ausgewertet. Die Darstellungen zeigen, daß für niedrige Beanspruchungsgrade ($\tau_{vd}/\beta_w(t_0) = 0,2 \div 0,25$ entspricht etwa $\tau_{vd}/\tau_{vum} \approx 0,5$) in guter Näherung ein linearer Zusammenhang zwischen Verschiebung und Beanspruchungsgrad besteht. Bei höheren Belastungsgraden ($\tau_{vd}/\beta_w(t_0) = 0,25 \div 0,30$ entspricht $\tau_{vd}/\tau_{vum} = 0,66 \div 0,70$) ist eine große Streubreite festzustellen (Bild 6.2). Die Annahme einer Linearität erfaßt die tatsächliche Abhängigkeit zwischen Verformung und Beanspruchungshöhe v.a. bei höherer Beanspruchung nur unzureichend.

Die Unabhängigkeit der Kriechfunktion $\varphi_v(t)$ von der Beanspruchungshöhe kann auch anhand der in den Anlagen 112 bis 114 gegenübergestellten $\varphi_v(t)$ -t-Beziehungen ausgewählter Versuchskörper der Serien AKZ2, AKZ4 und AKZ6 überprüft werden. Ein Einfluß des Spannungsniveaus ist negierbar, wenn zu jedem Zeitpunkt t_i die Beziehung $\frac{v_k(t_i)}{v_0} = \varphi_v(t_i)$ für die aufgebrachten Verbunddauerspannungen gleich ist. Aus den Versuchswerten ist zu erkennen, daß die $\varphi_v(t)$ -Werte der höher beanspruchten Versuchskörper i.a. etwas höher liegen als die niedrig beanspruchter Proben. Die vorstehende Aussage geht auch aus der Darstellung des Belastungsgrades über der Kriechzahl in Bild 6.4 hervor. Die o.g. Forderung kann damit nur als annähernd erfüllt angesehen werden.

6.2 Einfluß der Betongüte

Aus Kurzzeitversuchen ist bekannt, daß für Betonrippenstähle im Bereich mäßiger Verschiebungen $v \leq 0,2 \div 0,3$ mm ein linearer Zusammenhang zwischen der Verbundspannung τ_v und der Betondruckfestigkeit β_w vorausgesetzt werden kann/6/.

Bei den Verbundkriechversuchen wurden zwei Betongüten, nämlich B25 und B55, untersucht. In den Anlagen 115 und 116 sind die $v(t)$ -t- bzw. $\varphi_v(t)$ -t-Beziehungen einzelner Versuchskörper der Serien AKZ2

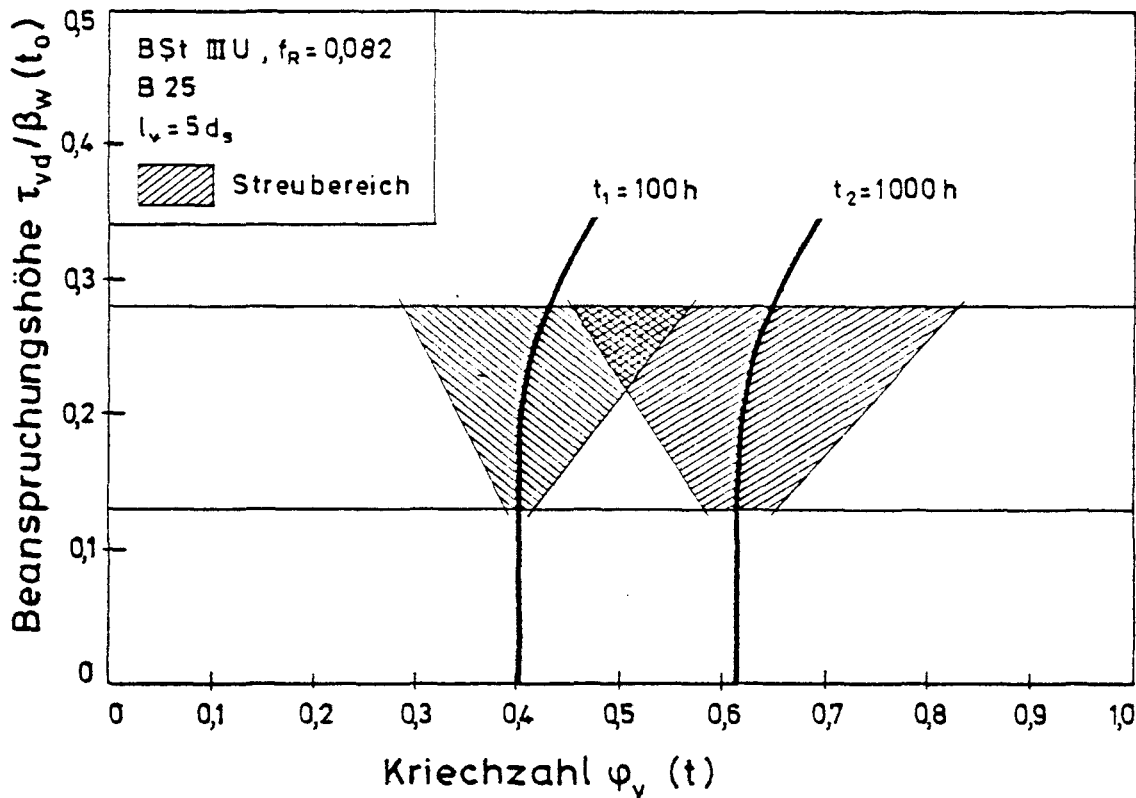


Bild 6.4 Kriechzahl in Abhängigkeit von Beanspruchungshöhe und Zeit

und AKZ4 für ein Lastniveau $\tau_{vd} = 0,66 \tau_{vu}$ gegenübergestellt. Die Kriechzahlen $\varphi_v(t)$ für den hochfesten Beton B55 liegen geringfügig höher als die für den niederfesten Beton B25. Unter Berücksichtigung der Streuung der Versuchsergebnisse sind bei gleicher Beanspruchungshöhe und bei gleicher Belastungsdauer die Kriechzahlen $\varphi_v(t)$ näherungsweise identisch, d.h. ein signifikanter Einfluß der Betondruckfestigkeit auf die Kriechfunktion $\varphi_v(t)$ ist nicht ableitbar. Die Unabhängigkeit von $\varphi_v(t)$ von der Betondruckfestigkeit ist eine Voraussetzung für ein lineares Verbundkriechen, da ja die τ_v -v-Linie des Kurzzeitverhaltens auf β_w normierbar ist.

Die Auftragung der Steigung A der $v(t)$ -t-Kurven über der an Begleitwürfeln zum Belastungsalter t_0 ermittelten Betondruckfestigkeit in Bild 6.5 zeigt eine mit steigender Betongüte vernachlässigbar geringe Zunahme der A-Faktoren.

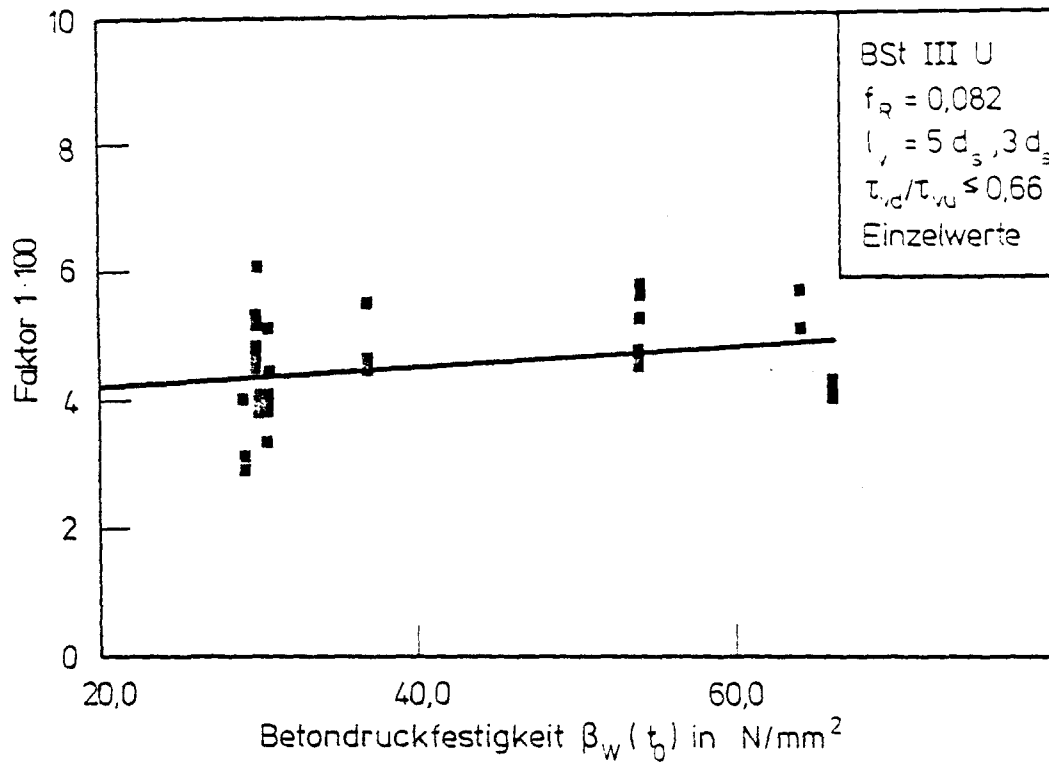


Bild 6.5 Einfluß der Betondruckfestigkeit auf die Steigung A der $v(t)$ -t-Beziehung

6.3 Einfluß des Belastungsalters

In der Regel wurden die Verbundkriechversuche zu einem Zeitpunkt t_0 begonnen, bei dem Einflüsse aus der Festigkeitsentwicklung ausgeschlossen waren. Um den Einfluß eines frühen Belastungsalters zu erfassen, wurden Versuchskörper der Serien AKZ8 und AKZ9 im Alter von $t_0 = 10 \pm 14$ Tagen sowie der Serien AKZ6 im Alter von $t_0 = 35$ Tagen belastet. Um einen Vergleich mit ausgehärtetem Beton zu erhalten, wurden Versuchskörper der Serien AKZ8 und AKZ9 in hohem Betonalter bei gleichem Lastniveau untersucht. Zum Vergleich mit älteren Prüfkörpern können auch die Ergebnisse der Serien AKZ11 und AKZ15 herangezogen werden. In Anlage 117 sind die Festigkeits- und Belastungswerte zusammengestellt.

Die Messung der Anfangsverschiebung v_0 ergab bei gleichem Lastniveau für den jungen Beton im Mittel etwas geringere Werte als für ältere Versuchskörper derselben Serie. Ein Vergleich der $v(t)$ -t-Kurven zweier Proben der Serie AKZ8 (Anlage 118) zeigt, daß bei

dem jungen Beton im Anfangsbereich ein steiler Verlauf zu verzeichnen ist, der ab einer Belastungsdauer von etwa $t = 10$ Stunden abflacht. Versuchskörper, die im Alter von $t_0 \geq 35$ Tagen belastet wurden, weisen einen stetigen Verlauf der $v(t)$ - t -Werte auf.

Bei den mit Hochofenzement hergestellten Versuchskörpern der Serie AKZ9 sind sowohl für den jungen als auch für den ausgehärteten Beton im Anfangsbereich steile, dann flachere $v(t)$ - t -Kurven ermittelt worden, während vergleichbare Versuchskurven der Serie AKZ15 ($t_0 > 100$ Tage) eine stetige Steigung aufweisen (Anlage 119).

Während sich bei den in hohem Alter belasteten Proben ab einer Belastungsdauer $t \approx 1$ h näherungsweise ein linearer Verlauf der $\varphi_v(t)$ - t -Linien abzeichnet, weisen die in jungem Alter belasteten Ausziehkörper einen nichtlinearen Verlauf auf.

Die $\varphi_v(t)$ -Werte für die jungen Proben der Serie AKZ8 sind im Anfangsbereich höher als die Kriechzahlen der in höherem Alter belasteten Versuchskörper derselben Serie bzw. vergleichbarer Proben der Serie AKZ11. Wie aus Anlage 120 hervorgeht, bestehen am Ende des Untersuchungszeitraumes ($t = 100$ bis 1000 Stunden) keine Unterschiede in den $\varphi_v(t)$ -Werten.

Bei den Ausziehkörpern der Serie AKZ9, die mit Hochofenzement hergestellt waren, ergeben sich dagegen bei den jungen Proben geringere Kriechzahlen. Zieht man zum Vergleich auch die in hohem Alter belasteten Versuchskörper der Serie AKZ15 heran, so sind die $\varphi_v(t)$ -Werte für den jungen Beton (AKZ9) bis zu einer Belastungsdauer von $t = 10$ Stunden höher als die der älteren Proben (Anlage 121).

Da die Anfangsverschiebungen v_0 der in hohem Alter belasteten Ausziehkörper der Serie AKZ9 bereits große Werte erreichen und nach dem Spalten Lunker im Verbundbereich bzw. eine geringere Verbundlänge als vorgegeben festgestellt wurden, sind die Versuchsergebnisse vorsichtig zu beurteilen.

6.4 Einfluß der Zementart

Im Rahmen von Untersuchungen über Einflüsse auf das Verbundverhalten von Stahl in Leichtbeton führten Martin und Janovic /5/ einige Tastversuche an Ausziehkörpern aus Normalbeton durch, die einer einstündigen Dauerlast unterworfen wurden. Bei der Betonherstellung wurde bei einer Mischung ein Hochofenzement verwendet. Das Belastungsalter lag bei etwa 14 bzw. 26 Tagen. Untersucht wurden zwei unterschiedliche Lagen: liegend und stehend entgegen der Setzrichtung des Betons.

Die Versuchskörper wurden bis zu einer Last F_0 beansprucht, die einer vorgegebenen Anfangsverschiebung $v_0 = 0,05$ mm bzw. 0,1 mm entsprach. Bei dem überwiegenden Teil der Proben wurde nach Erreichen der Last F_0 eine Zwischenentlastung eingeschaltet. Einige Ausziehkörper wurden ohne Zwischenentlastung einer einstündigen Belastung mit F_0 ($v = 0,05$ mm) unterzogen.

Martin und Janovic stellten fest, daß die Gesamtverschiebung $v(t) = v_0 + v_k(t)$ bei Normalbeton mit Portlandzement etwa das zwei- bis dreifache des Anfangswertes v_0 betrug. Bei Verwendung von Hochofenzement lag das Verhältnis Gesamtverschiebung $v(t = 1 \text{ h})$ zu Anfangsverschiebung bei ungefähr 1,5. Ein Einfluß der Bewehrungslage zur Betonierrichtung war nicht erkennbar.

Mit den Versuchsergebnissen lassen sich für Normalbeton mit Hochofenzement mittlere Kriechzahlen $\varphi_v(t = 1 \text{ h})$ von 0,5 bis 0,75 bestimmen. Für Normalbeton mit Portlandzement variieren die Kriechzahlen $\varphi_v(t = 1 \text{ h})$ zwischen 1,2 und 2,85.

Der Einfluß der Zementart kann bei Berücksichtigung des Belastungsalters anhand der Versuchsergebnisse der Serien AKZ8 und AKZ9 sowie der Serien AKZ2 und AKZ15 untersucht werden.

In den Anlagen 122 und 123 sind die $v(t)$ -t- bzw. $\varphi_v(t)$ -t-Beziehungen der im jungen Alter ($t_0 = 10$ bzw. 14 Tage) belasteten Aus-

ziehungskörper der Serien AKZ8 und AKZ9 gegenübergestellt. Die $v(t)$ - t -Kurven der mit Hochofenzement hergestellten Versuchskörper verlaufen etwas flacher als die der mit Portlandzement betonierten Proben. Die $\varphi_v(t)$ -Werte liegen im Anfangsbereich bis $t = 10$ Std. bei den Proben mit HOZ höher, während ab $t \geq 10$ Std. die Kriechzahlen für die mit PZ hergestellten Versuchskörper größer sind. Für eine Belastungsdauer von $t = 1$ h ergeben sich $\varphi_v(t)$ -Werte von 0,3 (für Normalbeton mit PZ) und 0,4 (für Normalbeton mit HOZ). Das von Martin und Janovic festgestellte günstige Kriechverhalten der mit Hochofenzement hergestellten Prüfkörper bis Belastungsdauer $t = 1$ h kann durch unsere Versuchsergebnisse nicht bestätigt werden.

Ein Vergleich der $v(t)$ - t - bzw. der $\varphi_v(t)$ - t -Kurven für Versuchskörper der Serien AKZ2 und AKZ15, die in hohem Betonalter belastet wurden, zeigt keinen signifikanten Einfluß der Zementart (Anlagen 124 und 125).

6.5 Einfluß der bezogenen Rippenfläche

Entsprechend der Wirkungsweise des Verbundes kommt der Oberflächenprofilierung der Stahlstäbe in Form von Rippen eine große Bedeutung zu, da erst durch diese der wirksame Scherverbund entsteht.

Die spontane Verschiebung v_0 hängt unmittelbar von der bezogenen Rippenfläche f_R ab. Mit steigender Rippenfläche wird die Verschiebung geringer, da die Beanspruchung der Betonkonsolen zwischen den Rippen bei hohen f_R -Werten absinkt. Damit ergibt sich auch ein Zusammenhang zwischen der zu bestimmten Verschiebungen gehörenden Verbundspannung τ_v und der bezogenen Rippenfläche. Aus umfangreichen Kurzzeit-Ausziehversuchen leiten Martin und Noakowski /6/ eine lineare Beziehung zwischen der auf die Betonfestigkeit bezogenen Verbundspannung und f_R ab:

$$\frac{\tau_v(v)}{\beta_w} = f(v) \cdot f_R \quad (6.4)$$

In der Anlage 126 sind für ausgewählte Versuchskörper der Serien AKZ2, AKZ3 und AKZ12 die $v(t)$ - t -Verläufe aufgetragen. Während ein Vergleich der Anfangsverschiebungen v_0 (die Dauerspannung betrug zwischen $\tau_{vd} = 0,63$ bis $0,70 \tau_{vu}$) eine Abhängigkeit von der bezogenen Rippenfläche nicht erkennen läßt, zeigt sich ein deutlicher Einfluß von f_R auf die Steigung A der $v(t)$ - t -Kurven. Die $v(t)$ - t -Linien verlaufen mit zunehmender bezogener Rippenfläche flacher. Trägt man die Steigung A der $v(t)$ - t -Kurven über der bezogenen Rippenfläche f_R auf (Bild 6.6), so ergibt sich ein linearer Zusammenhang. Für die hier untersuchten bezogenen Rippenflächen - die Versuche mit $f_R = 0,072$ sind noch nicht ausgewertet - läßt sich die Steigung A in Abhängigkeit von f_R ermitteln zu:

$$A = -1,75 f_R + 0,187 \quad (6.5)$$

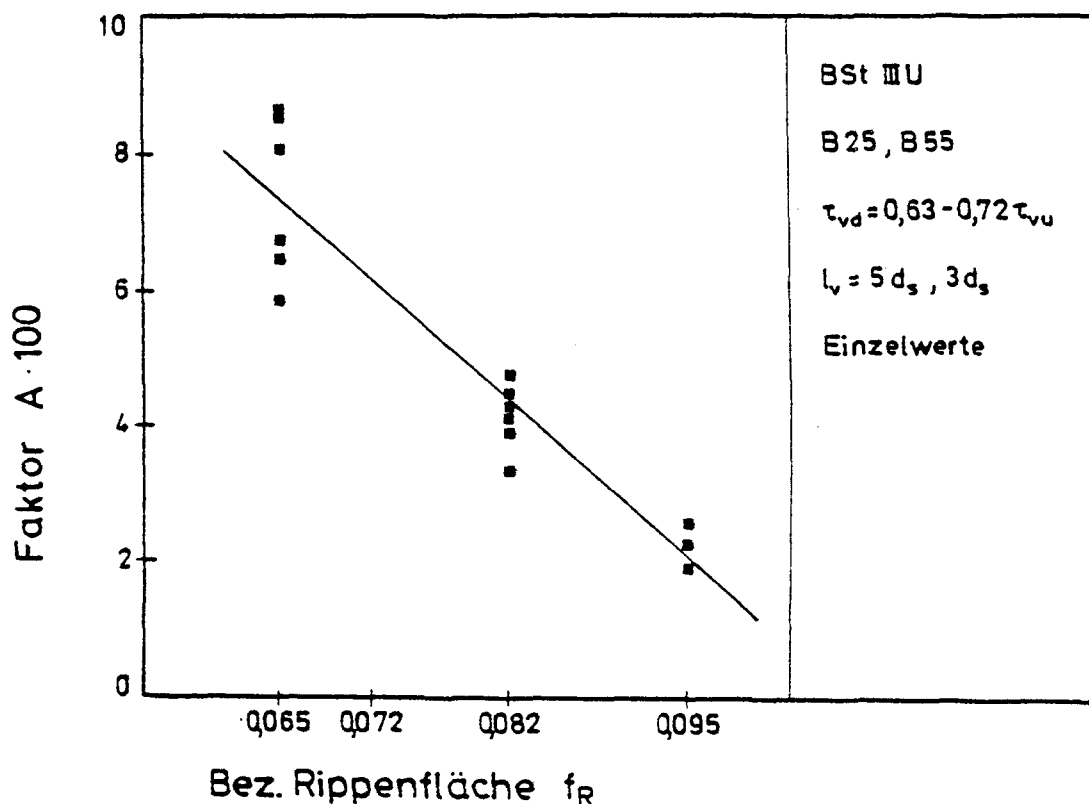


Bild 6.6 Einfluß der bezogenen Rippenfläche auf die Steigung A der $v(t)$ - t -Beziehung

wahrscheinlich darauf zurückzuführen, daß die Proben beim Belastungsvorgang etwas überbelastet wurden. Damit erklären sich auch die diskontinuierlichen Verläufe der $\varphi_v(t)$ -Werte (Anlagen 104 und 105).

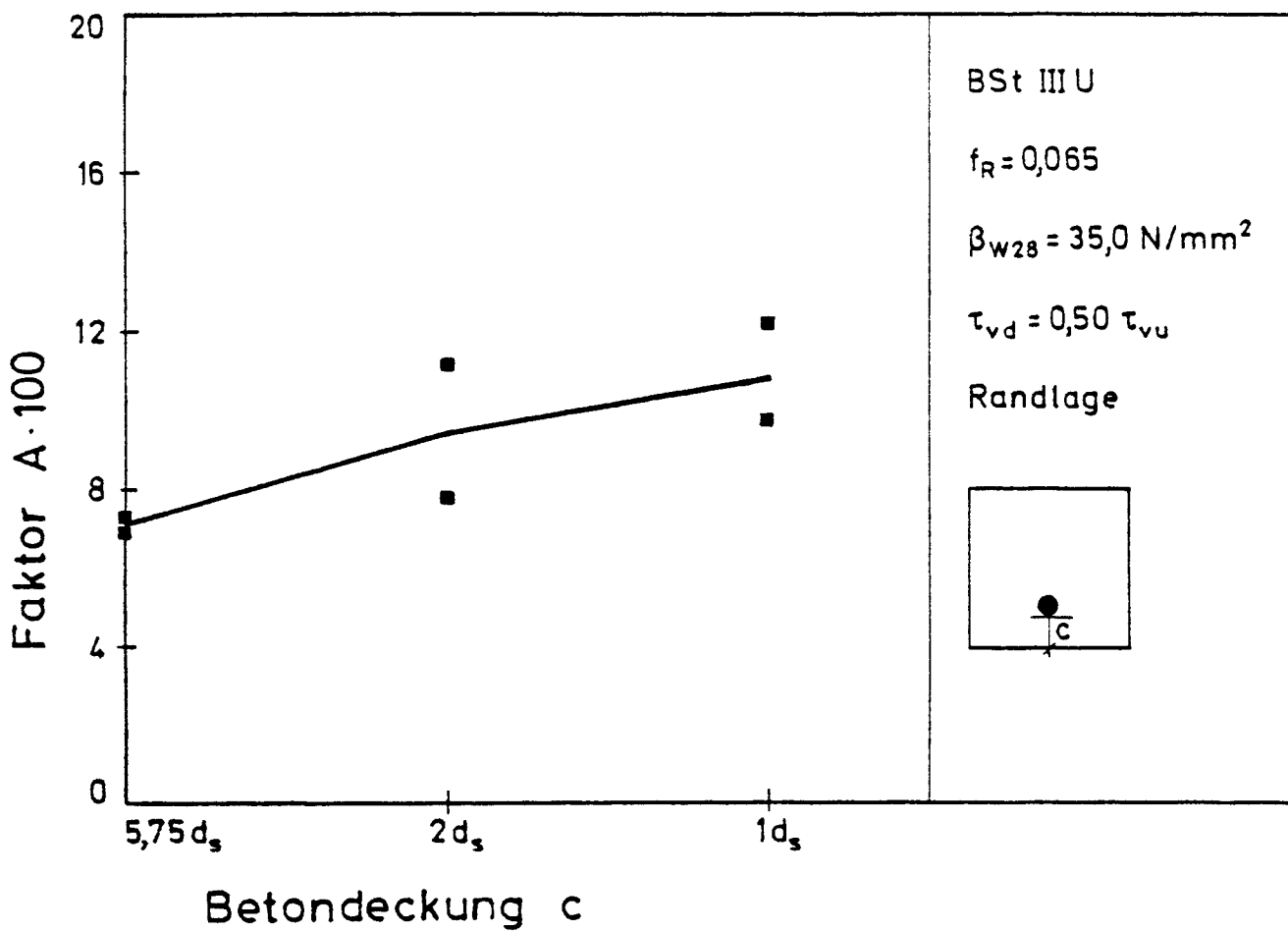


Bild 6.7 Einfluß der Betondeckung auf die Steigung A der $v(t)$ - t -Beziehung bei Bewehrungsanordnung in Randlage

Da die zeitabhängige Verschiebungszunahme mit abnehmendem f_R ansteigt, ergeben sich auch höhere $\varphi_V(t)$ -Werte. In Anlage 127 werden die Kriechzahlen $\varphi_V(t)$ für die Betonierserien AKZ2, AKZ3 und AKZ12 verglichen. Für eine Belastungsdauer von $t = 1400$ h berechnet sich mit den Versuchswerten für die Serie AKZ12 ($f_R = 0,060$) $\varphi_V(t) = 1,1$. Für die Serie AKZ2 ($f_R = 0,082$) lassen sich Kriechzahlen $\varphi_V(t = 1400)$ von 0,55 gegenüber $\varphi_V(t = 1400) = 0,29$ für die Serie AKZ3 ($f_R = 0,095$) ermitteln.

6.6 Einfluß der Betondeckung

Der Einfluß der Betondeckung wurde an den exzentrischen Ausziehkörpern der Serien AKE1, AKE2 und AKE4 untersucht. Wie die Darstellung der Versuchskörper in Anlage 2 zeigt, wurde der Bewehrungsstab zum einen auf der Mittelachse in Randlage, zum anderen auf der Diagonalen in Ecklage angeordnet. Zum Vergleich wurden bei den Serien AKE1 und AKE2 auch zentrisch bewehrte Proben geprüft. Während der Belastungsdauer trat bei keinem Versuchskörper Versagen ein.

Aus der Darstellung der im Kurzzeitversuch ermittelten τ_V - v -Beziehungen (siehe Bilder 5.2 und 5.3, Abschnitt 5) ist zu entnehmen, daß das "Verschiebungspotential" bis zum Bruch bei den Versuchskörpern mit exzentrischer Stablage wesentlich geringer ist als bei Proben mit zentrischem Stab. Dementsprechend sind die Anfangsverschiebungen sowie die Kriechverschiebungen bei den exzentrischen Proben ebenfalls erheblich kleiner als bei den zentrischen Ausziehkörpern.

Die Steigung A der $v(t)$ - t -Kurven ist in den Bildern 6.7 und 6.8 in Abhängigkeit von der Betondeckung aufgetragen. Für die untersuchten Stablagen (Rand- bzw. Ecklagen) ergeben sich mit abnehmender Betondeckung ansteigende A -Werte.

Die im Anfangsbereich geringe Verschiebungszunahme $v(t)$ bei den Versuchskörpern der Serie AKE2 (siehe Anlage 54 und 55) ist

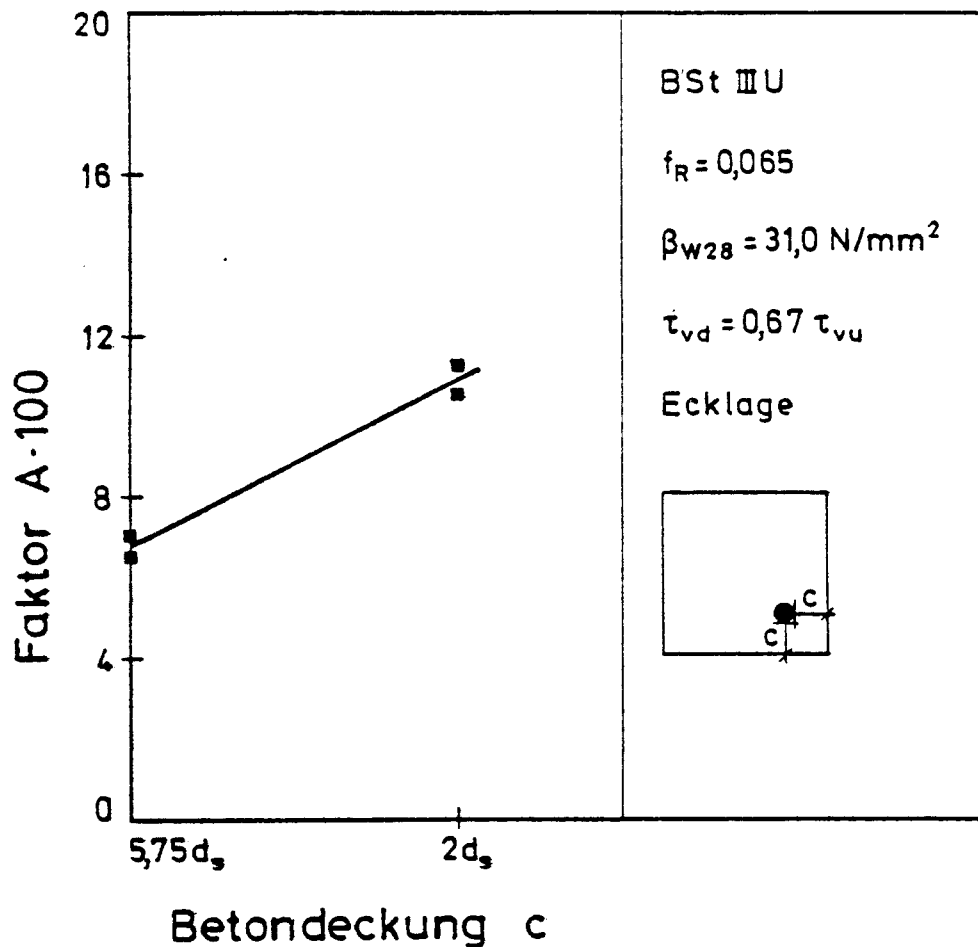


Bild 6.8 Einfluß der Betondeckung auf die Steigung A der $v(t)$ - t -Beziehung bei Bewehrungsanordnung in Ecklage

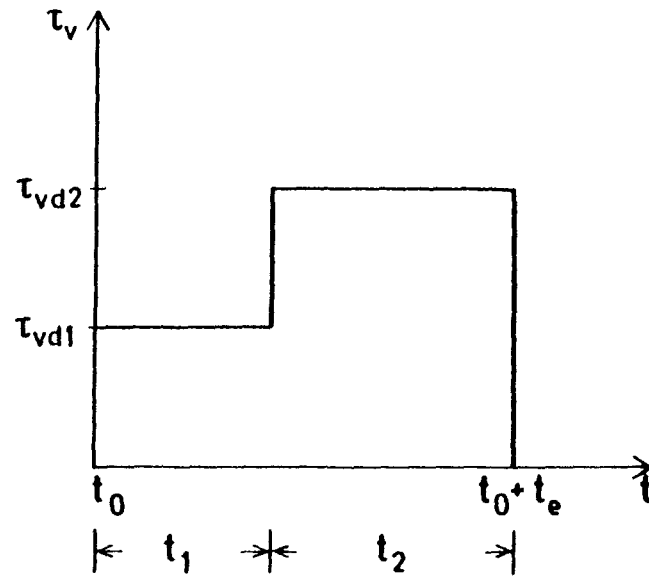
6.7 Mehrstufenbelastungen

Der Einfluß einer einmaligen Laständerung (Zweistufenversuch) auf das Verbundkriechen wurde mit den Serien AKZ6 und AKZ11 untersucht. Wie in Bild 6.9 schematisch dargestellt, wurden 2 Belastungsgeschichten untersucht. Zum Vergleich wurden Einstufenversuche mit $\tau_{vd} = \tau_{v1}$ bzw. $\tau_{vd} = \tau_{v2}$ durchgeführt.

Belastungsgeschichte 1

Nach Erstbelastung im Alter t_0 wirkt die Dauerspannung τ_{vd1} über die Zeitdauer t_1 . Zum Zeitpunkt $t_0 + t_1$ wird die Verbundspannung auf τ_{vd2} erhöht und bleibt über die Zeitdauer t_2 konstant.

Belastungsgeschichte 1



Belastungsgeschichte 2

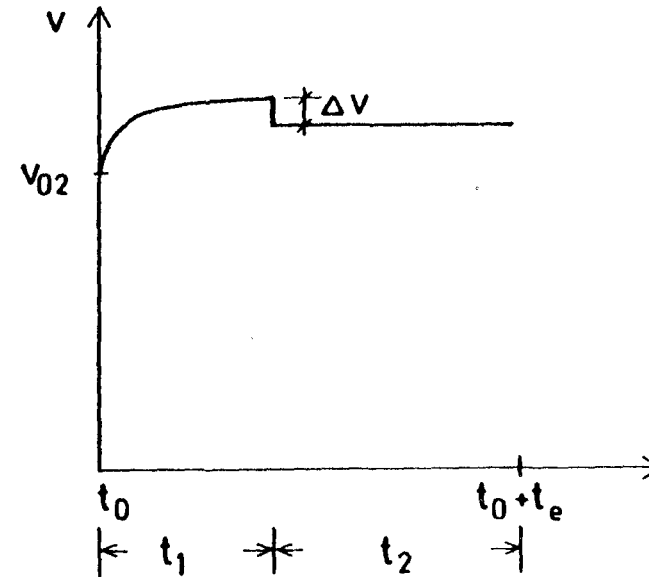
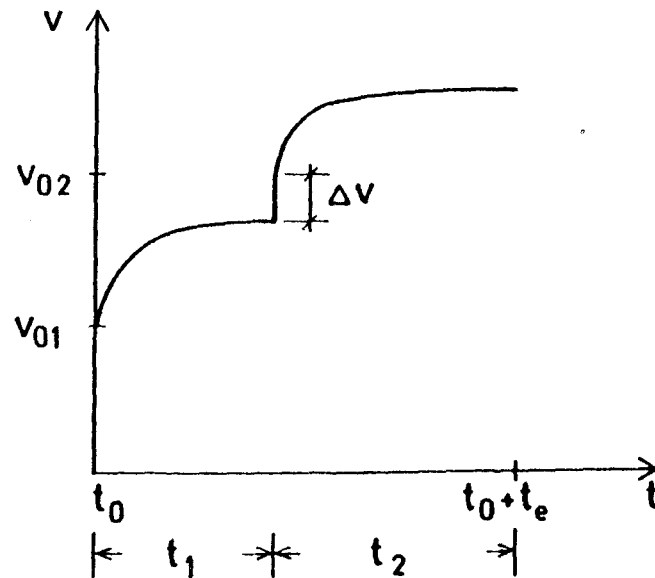
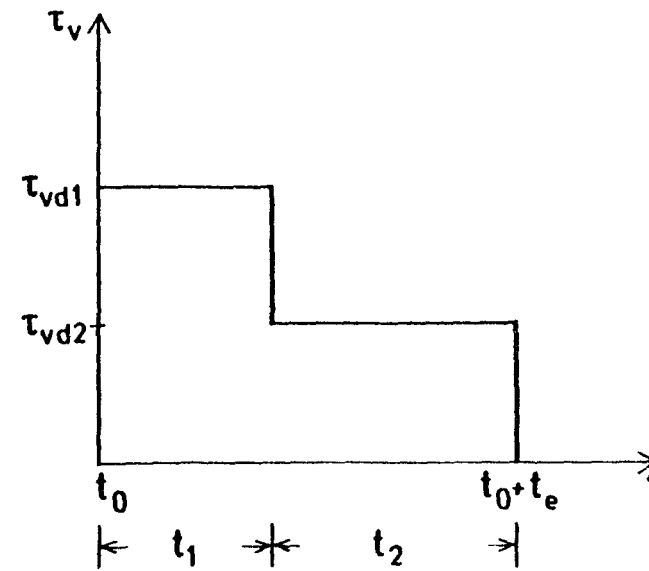


Bild 6.9 Schematische Darstellung der untersuchten Belastungsgeschichten

Die aufgebrachte Dauerspannung τ_{vd2} ist so hoch, daß die zugehörige Spontanverschiebung v_{o2} größer ist als die unter der Spannungsstufe τ_{vd1} aufgetretene Gesamtverschiebung $v_{ges} = v_{o1} + v_{k1}(t_1)$. Damit ist die Erhöhung der Dauerspannung mit einem Verschiebungssprung Δv verbunden.

Belastungsgeschichte 2

Nach Einwirken einer Dauerspannung τ_{vd1} ab dem Belastungszeitpunkt t_0 wird zum Zeitpunkt $t_0 + t_1$ auf die Verbundspannung τ_{vd2} entlastet. Da die Verbundspannung τ_{vd2} kleiner ist als τ_{vd1} und damit auch $v_{o2} < v_{o1} + v_{k1}$ ist, verzeichnet man zum Zeitpunkt $t_0 + t_1$ eine geringfügige Verminderung der Gesamtverschiebung. Über die Belastungsdauer t_2 mit τ_{vd2} bleibt die Verschiebung annähernd konstant bzw. vermindert sich gering (verzögert elastische Rückverformung).

Die Ausziehkörper der Serie AKZ6, die entsprechend der Belastungsgeschichte 1 geprüft wurden, wurden im Alter $t_0 = 35$ Tage mit $\tau_{vd1} = 0,46 \tau_{vu}$ beansprucht. Nach einer Zeitdauer $t_1 = 26$ Tage wurde die Verbundspannung auf $\tau_{vd2} = 0,72 \tau_{vu}$ erhöht und bis zum Entlastungszeitpunkt $t_0 + t_e = 117$ Tage konstant gehalten. Die Versuchskörper der Serie AKZ11 aus hochfestem Beton wurden im Alter $t_0 = 329$ Tage zunächst mit $\tau_{vd1} = 0,3 \tau_{vu}$, im Alter von 365 Tagen mit $\tau_{vd2} = 0,5 \tau_{vu}$ beansprucht. Der Zeitraum t_2 betrug 47 Tage. In Anlage 128 sind die Verschiebungen zu den Zeitpunkten t_0 , $t_0 + t_1$ und $t_0 + t_e$ für die Versuchskörper der Serien AKZ6 und AKZ11 tabellarisch zusammengestellt.

Die Ausziehkörper der Serie AKZ6, die entsprechend der Belastungsgeschichte 1 beansprucht wurden, weisen eine relativ niedrige spontane Anfangsverschiebung auf. Die Lasterhöhung von τ_{vd1} auf τ_{vd2} verursacht eine Verschiebungszunahme Δv , die ebenfalls sehr gering bleibt. Nach der Spannungserhöhung entspricht $v_{ges} = v_{o1} + v_{k1} + \Delta v$ etwa der Anfangsverschiebung bei Belastung auf $\tau_{vd} = \tau_{vd2} = 0,72 \tau_{vu}$.

In den ersten 24 Stunden nach der Lasterhöhung ist - wie aus Bild 6.10 hervorgeht - eine große Verschiebungszunahme zu verzeichnen, die etwa 65 % der Verschiebung nach Lasterhöhung beträgt. Innerhalb der ersten 50 Minuten treten bereits etwa 45 % der zeitabhängigen Verschiebung auf. Die im Einstufenversuch mit $\tau_{vd} = \tau_{vd2}$ ermittelte Verschiebungszunahme beträgt nach 50 Minuten etwa 35 % und nach 24 Stunden etwa 57 % der zeitabhängigen Verschiebung. Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse muß berücksichtigt werden, daß der Probekörper AKZ6.13 vorbelastet war und daß beim Körper AKZ6.14 etwa 75 Stunden nach Lasterhöhung ein langsamer Druckabfall zu verzeichnen war, d.h. bei Versuchsende entsprach $\tau_{vd2} = \tau_{vd1}$.

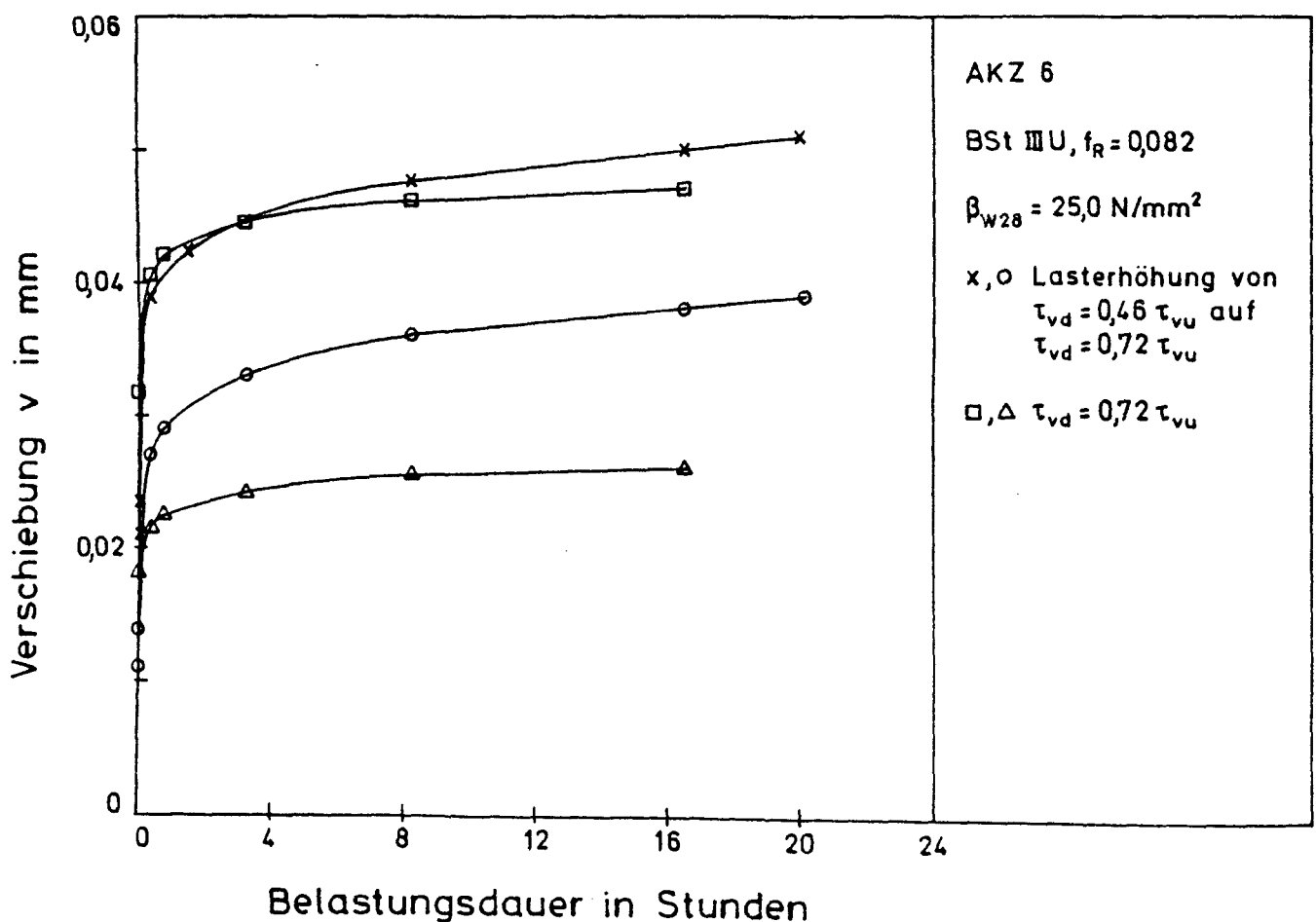


Bild 6.10 Vergleich der zeitabhängigen Verschiebungszunahme nach Lasterhöhung von $\tau_{vd} = 0,46 \tau_{vu}$ auf $\tau_{vd} = 0,72 \tau_{vu}$ mit derjenigen im Einstufenversuch mit $\tau_{vd} = 0,72 \tau_{vu}$

Die Versuchskörper der Serie AKZ11, die entsprechend der Belastungsgeschichte 1 eine Lasterhöhung von $\tau_{vd1} = 0,3 \tau_{vu}$ auf $\tau_{vd2} = 0,5 \tau_{vu}$ erfuhren, weisen ebenfalls einen so großen Verschiebungssprung Δv auf, daß die Gesamtverschiebung $v_{ges} = v_{01} + v_{k1} + \Delta v$ etwa der Anfangsverschiebung bei Belastung auf $\tau_{vd} = \tau_{vd2} = 0,5 \tau_{vu}$ entspricht. Die Verschiebungszunahme betrug nach etwa 2 Stunden nur 25 % und nach 90 Tagen etwa 60 % der zeitabhängigen Verschiebung nach Lasterhöhung.

Bei allen Versuchskörpern der Serien AKZ6 und AKZ11, die der Belastungsgeschichte 2 unterworfen wurden, war die Lastverminderung mit einer geringfügigen elastischen Rückverformung verbunden. Die Proben der Serie AKZ6 zeigten anschließend eine weitere geringe Rückverformung, während bei den Versuchskörpern der Serie AKZ11 eine vernachlässigbare Verschiebungszunahme zu beobachten war.

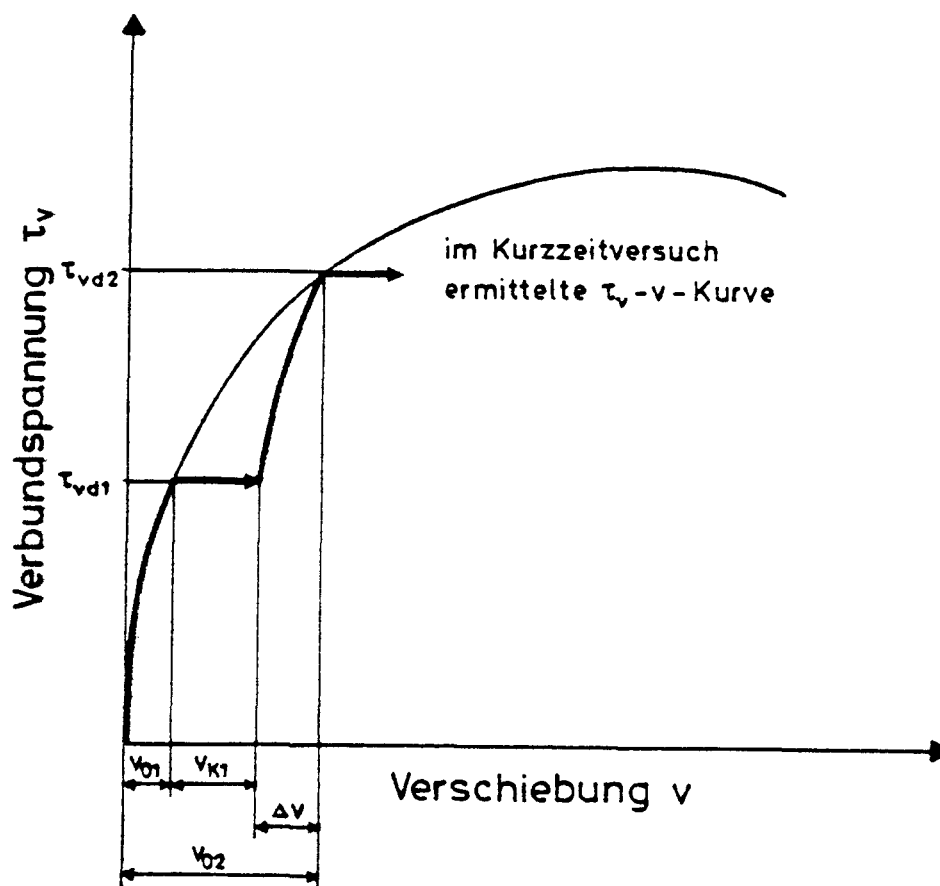


Bild 6.11 Schematische Darstellung der Verschiebungszunahme bei Mehrstufenversuchen

Aus den Versuchsergebnissen ist abzulesen, daß eine Spannungserhöhung mit einer spontanen Verschiebungszunahme verbunden ist, wenn der unmittelbar vor der Spannungserhöhung erreichte Verschiebungsweg kleiner als die lastabhängige Verschiebung der neuen Spannungsstufe ist. Durch den Spannungssprung $\Delta\tau_{VD} = \tau_{VD2} - \tau_{VD1}$ wird das Kurzzeit-Verbundgesetz wieder "erreicht" (s. Bild 6.11). Nach einer Lastverminderung kann angenommen werden, daß die Verschiebung $v_{ges} = v_{01} + v_{k1}$ über die weitere Belastungsdauer annähernd konstant bleibt.

6.8 Versuche zur Ermittlung der Dauerstandfestigkeit des Verbundes

Um die Dauerstandfestigkeit des Verbundes τ_{VD} unter konstanter Beanspruchung einzugrenzen, wurde eine Reihe von Versuchskörpern Verbundspannungen $\tau_{VD} > 0,7 \tau_{VU}$ unterworfen. Dauerspannungen $\tau_{VD} \leq 0,7 \tau_{VU}$ führen nach den Versuchsergebnissen weder bei zentrischer noch bei exzentrischer Stablage zum Verbundversagen, d.h. $\tau_{VD} \geq 0,7 \tau_{VU}$.

In Bild 6.12 ist nochmals das im Versuch zu beobachtende Verbundkriechverhalten dargestellt. Bei Beanspruchungen unterhalb der Verbunddauerstandfestigkeit nimmt die Kriechgeschwindigkeit stetig ab, es liegt sog. primäres Kriechen vor. Bei hohen Belastungsgraden $\tau_{VD} > \tau_{VD}$ kann man drei Bereiche des Kriechens unterscheiden. Im primären Bereich nimmt die Kriechgeschwindigkeit ab, im sekundären ist sie konstant, und im tertiären Bereich nimmt sie progressiv bis zum Eintreten eines Kriechbruches zu.

Bevor auf die Versuchsergebnisse eingegangen wird, soll hier eine besondere Problematik von Verbundkriechversuchen angesprochen werden. Die Verbunddauerspannung τ_{VD} wird auf der Grundlage von Kurzzeitversuchen festgelegt, in denen die Verbundfestigkeit als Mittelwert aus zumeist drei in der Regel voneinander deutlich abweichenden Einzelergebnissen bestimmt wird. Aufgrund der Streuung der Versuchsergebnisse wird der in Realität vorhandene Belastungs-

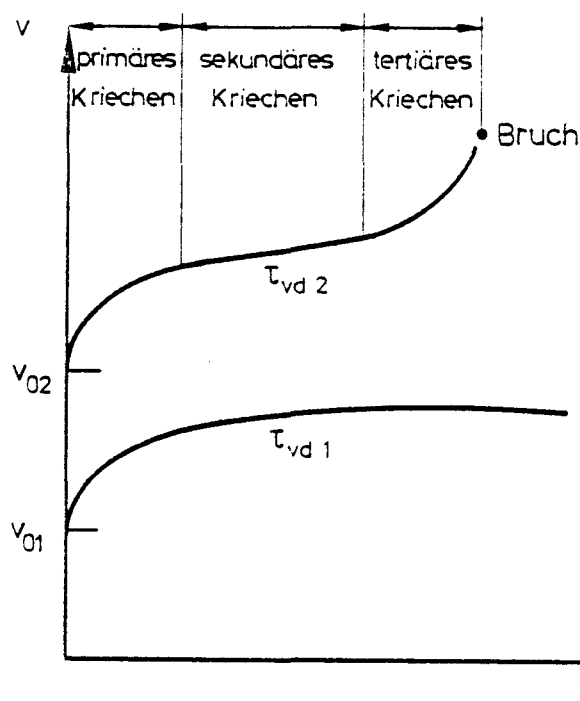


Bild 6.12 Verbundkriechen bei unterschiedlichem Beanspruchungsgrad

grad bei jedem Einzelversuch von dem nominell angesetzten Belastungsgrad τ_{vd}/τ_{vum} abweichen.

In den Darstellungen der $v(t)$ -t- bzw. $\phi_v(t)$ -t-Beziehungen für Versuche mit hohem Belastungsgrad $\tau_{vd} > 0,7 \tau_{vum}$, die in den Anlagen 9 bis 108 enthalten sind, zeichnet sich ein Kriechbruch ab, wenn die $v_k(t)$ -Werte bzw. die $\phi_v(t)$ -Werte progressiv ansteigen. Das Kriechversagen ist mit G für Gleit- und mit Sp für Sprengbruch gekennzeichnet.

In Bild 6.13 sind die Lebensdauern sämtlicher Versuche in Abhängigkeit von der Beanspruchungshöhe aufgetragen. Die mit einem Pfeil versehenen Versuchswerte kennzeichnen Proben, die während der Belastungsdauer nicht versagten. Wie aus der Darstellung hervorgeht, streuen die Ergebnisse beträchtlich. Da die Belastungsdauer bei den Standversuchen mit hohem Beanspruchungsgrad nur etwa 1000 Stunden betrug und zudem Versuche mit $0,80 \tau_{vu} > \tau_{vd} > 0,70 \tau_{vu}$ fehlen, läßt sich τ_{vd} nur eingrenzen zu: $0,80 \tau_{vu} > \tau_{vd} \geq 0,70 \tau_{vu}$.

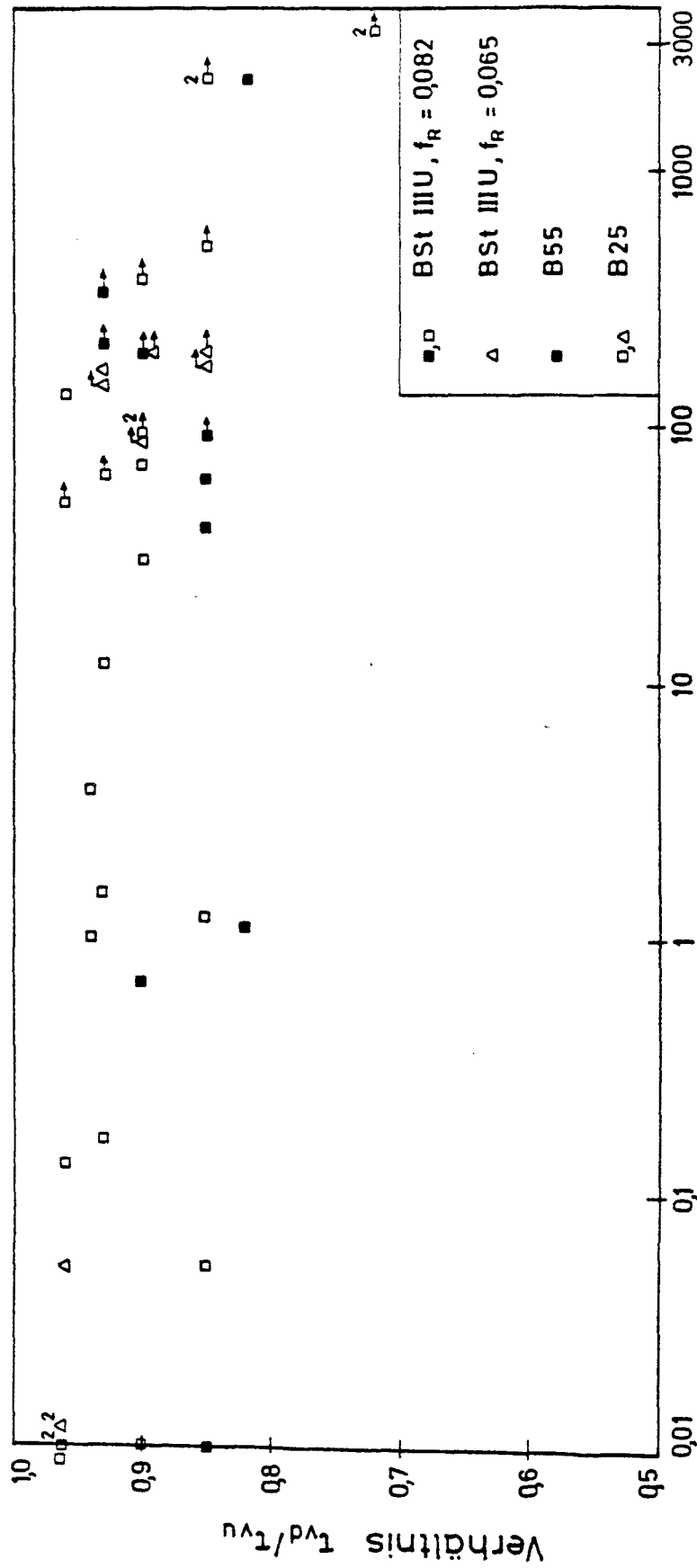


Bild 6.13 Lebensdauer in Abhängigkeit von der Beanspruchungshöhe

7. VERHALTEN DER VERSUCHSKÖRPER NACH STATISCHER DAUERBEANSPRUCHUNG

Nach Beendigung der Dauerstandversuche wurde an Versuchskörpern, die nicht versagt hatten, i.d.R. nach Entlastung der Ausziehkörper die spontan elastische Rückverformung v_{R0} sowie die verzögert-elastische Rückverformung $v_R(t)$ gemessen. Die Meßwerte sind in der Anlage 129 auszugsweise zusammengestellt. Die Ergebnisse zeigen, daß die spontan-elastische ebenso wie die verzögert-elastische Rückverformung sehr gering ist. Auf die Anfangsverschiebung v_0 bezogen, beträgt die spontan-elastische Rückverformung bei zentralen Ausziehversuchen bis zu max. 12 %, der verzögert-elastische Verformungsanteil liegt bei 4 %. Aus der Zusammenstellung in Anlage 129 ist abzulesen, daß eine hohe Verbunddauerspannung eine größere Rückverformung erzeugt als eine niedrige Dauerspannung. Ein Einfluß weiterer Parameter konnte nicht bestimmt werden.

Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, daß die Rückverformung nur einen vernachlässigbar geringen Anteil an der Gesamtverschiebung $v(t)$ erreicht, d.h. die spontane und die zeitabhängige Verformung sind im wesentlichen irreversibler plastischer Natur.

Nach Abschluß der Dauerstandversuche wurden die Versuchskörper einer Kurzzeitbeanspruchung unterworfen. In Bild 7.1 ist die τ_v - v -Beziehung vorbelasteter Körper schematisch dargestellt.

Aus der Darstellung geht hervor, daß der τ_v - v -Verlauf der vorbelasteten Versuchskörper im Vergleich zu an jungfräulichen Körpern gewonnenen τ_v - v -Linien durch einen steilen Anstieg gekennzeichnet ist. Bei einer Stabendverschiebung von z.B. $v = 0,1$ mm werden Verbundspannungen erreicht, die etwa das Zweifache unvorbelasteter Prüfkörper betragen. Erst kurz vor Erreichen der Verbundfestigkeit treten deutliche Verschiebungen auf. Auch das Kurzzeitverbundverhalten vorbelasteter Körper zeigt damit die Irreversibilität der

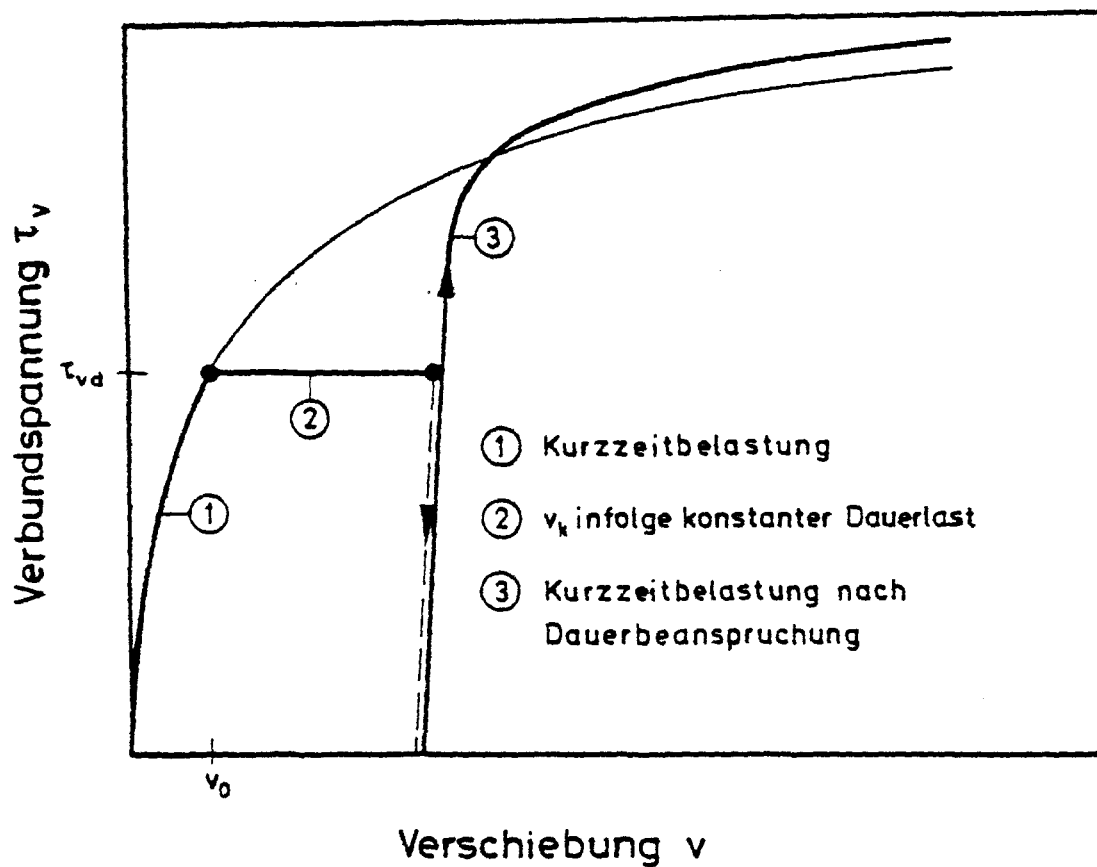


Bild 7.1 Schematische Darstellung der τ_v - v -Beziehung vorbelasteter Versuchskörper

durch die Verbunddauerspannung hervorgerufenen Verschiebungen. In den Anlagen 130 bis 132 sind beispielhaft für einige Serien die τ_v - v -Kurven jungfräulicher und vorbelasteter Versuchskörper dargestellt. Die höher vorbelasteten Proben, deren Gesamtverschiebung $v(t) = v_0 + v_k(t)$ bei Entlastung größer ist als die niedrig belasteter Proben, zeigte erwartungsgemäß einen steiferen Verbund.

Ein Vergleich der Verbundfestigkeiten unvorbelasteter und vorbelasteter Versuchskörper (s. Anl. 133) läßt einen ungünstigen Einfluß der Dauerstandbelastung nicht erkennen. Die Verbundfestigkeiten der einer Dauerbeanspruchung unterworfenen Proben liegen, unabhängig von den untersuchten Parametern, bei etwa 91 bis 126 % der in den Kurzzeitversuchen an jungfräulichen Ausziehkörpern ermittelten mittleren Verbundfestigkeiten $\tau_{vum}(t_0)$.

8. ZUSAMMENFASSUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE

Das Verbundkriechverhalten unter konstanter Dauerspannung wurde sowohl an zylindrischen Ausziehkörpern mit zentrisch einbetoniertem Bewehrungsstab als auch an quadratischen Ausziehkörpern mit exzentrischer Stablage studiert. Bei den Einstufenversuchen wurden die Höhe der Dauerspannung, die Betongüte, das Belastungsalter, die Zementart, die bezogene Rippenfläche sowie die Betondeckung variiert. Zudem wurden Zweistufenversuche und Versuche mit sehr hoher Dauerspannung zur Ermittlung der Dauerstandfestigkeit des Verbundes durchgeführt. Die Untersuchungsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Die zu unterschiedlichen Belastungshöhen gehörenden $v(t)$ - t -Kurven stellen im doppellogarithmischen Maßstab annähernd parallel verlaufende Geraden dar. Die Darstellung der Isochronen des Verbundkriechens zeigt, daß bei niedrigen Beanspruchungsgraden τ_{vd}/τ_{vum} bis 0,5 Linearität zwischen Verschiebung und Beanspruchungshöhe vorausgesetzt werden kann. Die Kriechfunktion $\Phi_v(t)$ kann damit in erster Näherung als unabhängig vom Lastniveau angenommen werden. Die Annahme einer Linearität zwischen Verformung und Beanspruchungshöhe erfaßt für höhere Beanspruchungsgrade die tatsächlichen Verhältnisse nur unzureichend.

2. Die Kriechfunktion $\Phi_v(t)$ ist bei gleichem Beanspruchungsgrad in erster Näherung von der Betongüte unabhängig.

3. Versuchskörper, die in einem Alter $t_0 < 35$ Tage belastet wurden, zeigten im doppellogarithmischen Maßstab einen nichtlinearen $\Phi_v(t)$ -Verlauf. Die Kriechzahlen sind während der ersten etwa 10 Stunden höher als bei älteren Proben. Die $v(t)$ - t -Kurven der jungen Proben weisen in der gewählten Darstellungsweise im Anfangsbereich einen steilen Verlauf auf, der ab einer Belastungsdauer von $t = 10$ h abflacht. Ab einem Belastungsalter von $t_0 \geq 35$ Tage ist ein Einfluß nicht mehr erkennbar.

4. Das von Martin und Janovic beobachtete günstige Verbundkriechverhalten von mit Hochofenzement hergestellten Versuchskörpern kann durch unsere Versuchsergebnisse nicht bestätigt werden.

5. Wie bei Kurzzeitversuchen ist auch bei Dauerstandversuchen ein deutlicher Einfluß der Profilierung, ausgedrückt durch die bezogene Rippenfläche f_R , feststellbar. Die $v(t)$ - t -Linien verlaufen im doppellogarithmischen Maßstab mit steigender bezogener Rippenfläche flacher. Für die hier untersuchten bezogenen Rippenflächen ergibt sich zwischen der Steigung A der $v(t)$ - t -Kurven und f_R ein linearer Zusammenhang der Form: $A = -1,75 f_R + 0,187$.

6. Um den Einfluß der Betondeckung zu studieren, wurden exzentrische Ausziehkörper untersucht, bei denen der Bewehrungsstab mit einem Randabstand von $1 d_s$ bzw. $2 d_s$ zum einen auf der Mittelachse und zum anderen auf der Diagonalen des Ausziehkörpers angeordnet war. Kurzzeitversuche an den exzentrischen Versuchskörpern ergaben, daß sich mit abnehmender Betondeckung die Verbundfestigkeiten und die Verschiebungen verringern. Die Versagensart wechselt vom Gleitbruch zum Sprengbruch.

Die Steigung A der $v(t)$ - t -Beziehung nimmt mit zunehmender Exzentrizität zu.

7. Bei den Zweistufenversuchen wurden zwei verschiedene Last-Zeit-Geschichten untersucht. Zum einen wurde die Dauerspannung von τ_{vd1} auf τ_{vd2} erhöht, dabei ist die zugehörige Anfangsverschiebung v_{o2} größer als die Gesamtverschiebung $v_{ges} = v_{o1} + v_{k1}(t_1)$. Damit ist die Spannungssteigerung mit einem Verschiebungssprung Δv verbunden. Die Gesamtverschiebung bis zum Entlastungszeitpunkt kann allein aus den Verschiebungen unter τ_{vd2} berechnet werden zu:

$$v_{ges}(t_1, t_2) = v_{o2} [1 + \varphi_v(t_2)] .$$

Zum anderen wurde eine "fallende" Spannungsgeschichte untersucht. Dabei stellt sich bei Entlastung eine geringfügige elastische

Rückverformung ein. Über die Belastungsdauer t_2 mit der verminderten Spannung bleibt die Verschiebung annähernd konstant bzw. vermindert sich gering (verzögert elastische Rückverformung). Damit ergibt sich die Gesamtverschiebung bis zum Entlastungszeitpunkt bei Vernachlässigung der Rückverformung zu:

$$v_{\text{ges}}(t_1, t_2) = v_{01} [1 + \varphi_v(t_1)] .$$

8. Um die Verbünddauerstandfestigkeit zu bestimmen, wurde eine Reihe von zentrischen Ausziehkörpern Dauerbeanspruchungen $\tau_{vD} > 0,7 \tau_{vU}$ unterworfen. Verbunddauerbeanspruchungen von $\tau_{vD} = 0,7 \tau_{vU}$ führten in keinem Fall zum Verbundversagen. Da die Dauerstandversuche mit hohem Lastniveau mit bis etwa $t \approx 1000$ h gefahren wurden und Versuche mit $0,80 \tau_{vU} > \tau_{vD} > 0,70 \tau_{vU}$ fehlen, läßt sich die Dauerstandfestigkeit des Verbundes eingrenzen zu:

$$0,80 \tau_{vU} > \tau_{vD} \geq 0,70 \tau_{vU} .$$

9. Die spontan-elastische sowie die verzögert-elastische Rückverformung nach Entlastung ist sehr gering. Auf die Anfangsverschiebung v_0 bezogen, beträgt die spontan-elastische Rückverformung bis zu 12 %, die verzögert-elastische Rückverformung liegt bei 4 %. Die spontanen und die zeitabhängigen Verformungen sind damit i.w. plastischer Natur. Die Irreversibilität der Verschiebungen geht auch aus dem Verbundspannungs-Verschiebungsverhalten der vorbelasteten Versuchskörper hervor. Im Kurzzeitversuch bauen sich die Verbundspannungen zunächst verschiebungsfrei auf. Erst bei Erreichen einer Verbundspannung, zu der eine Verschiebung entsprechend der im Dauerstandversuch "aufgezehrten" Verformung gehört, nehmen die Verformungen bei Laststeigerung zu. Das Kurzzeit-Verbundgesetz wird wieder erreicht, der weitere Verlauf entspricht der τ_v - v -Beziehung der unbelasteten Proben.

Die Verbundfestigkeiten der einer Dauerbeanspruchung unterworfenen Versuchskörper erreichen die Verbundfestigkeiten der unvorbelasteten Proben. Ein Einfluß der variierten Parameter ist nicht feststellbar.

9. NACHRECHNUNG VON VERSUCHSERGEBNISSEN MIT BEKANNTEN ANSÄTZEN FÜR DIE VERBUNDKRIECHFUNKTION $\varphi_V(t)$

Die Verbundkriechuntersuchungen unter konstanter Dauerspannung haben gezeigt, daß die Auftragung der Kriechverschiebungen über die Belastungsdauer im doppellogarithmischen Maßstab näherungsweise eine lineare Abhängigkeit ergibt. Die bei unterschiedlichem Beanspruchungsniveau ermittelten $v(t)$ - t -Beziehungen verlaufen parallel zueinander. Dabei wird vorausgesetzt, daß die angelegte Verbunddauerspannung so niedrig ist, daß Kriechbruch nicht entsteht.

Franke /3/, der die erste grundlegende Arbeit über das Verbundkriechen verfaßte, schließt aus der beobachteten Parallelität der $v(t)$ - t -Kurven, daß unabhängig von der spontanen Anfangsverschiebung für alle Beanspruchungshöhen unterhalb τ_{VD} ein und dieselbe Kriechfunktion benutzt und die Gültigkeit der Beziehung

$$v(t) = v_0 + v_k(t) = v_0 [1 + \varphi_V(t)] \quad (9.1)$$

angenommen werden kann.

Für die Kriechfunktion $\varphi_V(t)$ gelangt Franke, unter Ausnutzung der Linearität der $v(t)$ - t -Verläufe bei doppellogarithmischer Darstellung, zu dem Ansatz:

$$\log v_2(t_2) = \log v_1 + (\log t_2 - \log t_1) A \quad (9.2)$$

In dieser Beziehung steht die Konstante A für die Steigung der $v(t)$ - t -Kurve im doppellogarithmischen Maßstab; t_2 ist ein beliebiger Zeitpunkt, an dem die Kriechverformung bestimmt werden soll; t_1 ist der Zeitpunkt, ab dem die Linearität gilt. Gleichung 9.2 umgeschrieben, ergibt:

$$\log \frac{v_2(t_2)}{v_1} = \log \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^A \quad \text{bzw.} \quad (9.3)$$

$$\frac{v_2(t_2)}{v_1} = \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^A \quad (9.4)$$

Mit $t_2 = t_1 + t_e$ (t_e = Belastungsdauer im Versuch) folgt:

$$\frac{v_2(t_1 + t_e)}{v_1} = \left(\frac{t_1 + t_e}{t_1} \right)^A \quad (9.5)$$

Durch Einsetzen von

$$v_2(t_1 + t_e) = v_1 [1 + \varphi_V(t_1 + t_e)]$$

ergibt sich

$$\varphi_V(t_1 + t_e) = \left(\frac{t_1 + t_e}{t_1} \right)^A - 1 \quad (9.6)$$

Franke setzt $\varphi_V(t_1 + t_e) = \varphi_V(t_e)$ sowie $t_1 = 0,1$ h und erhält damit

$$\varphi_V(t_e) = (1 + 10 t_e)^A - 1 \quad (9.7)$$

Für die von Franke untersuchten Ausziehkörper mit kurzer Einbetungslänge $l_V = 4 d_s$, Betonrippenstahl 450/500 RU, $d_s = 16$ mm, $f_R = 0,076$ und Normalbeton mit einer Druckfestigkeit $\beta_w = 45,5$ N/mm² gilt

$$\varphi_V(t_e) = (1 + 10 t_e)^{0,082} - 1 \quad (9.8)$$

t_e = Belastungsdauer in Stunden

Zu den experimentellen Untersuchungen von Franke ist anzumerken, daß die Standzeit der in sehr begrenzter Anzahl geprüften Ausziehkörper aus Normalbeton nur etwa einen Monat betrug. Mit Ausnahme einer Spannungserhöhung fehlen Parameterstudien gänzlich.

In den Anlagen 134 und 135 werden mit dem Ansatz von Franke berechnete Kriechzahlen mit den Versuchswerten verglichen. Für die Darstellung wurden eine gute sowie eine schlechte Anpassung an die Versuchsergebnisse gewählt. Zur Berechnung der Steigung A wurden alle Meßwerte des angegebenen Einzelversuches ab $t_0 = 0,1$ h angesetzt. Wie die Darstellungen zeigen, erhält man mit diesem Ansatz stets zu kleine Kriechzahlen. Die Abweichung ist bei geringer Belastungsdauer höher und nimmt mit hoher Belastungsdauer ab. Mit

der Kriechfunktion $\varphi_V(t)$ nach Gleichung 9.7 wird zudem der vorausgesetzte lineare Verlauf der $\varphi_V(t)$ -Werte nicht erzielt.

Beim Vergleich der Steigungen A der $v(t)$ -t-Kurven fällt auf, daß der von Franke ermittelte A-Wert deutlich höher liegt als die in diesen Untersuchungen für entsprechende Versuchsbedingungen gefundenen Steigungen.

Tabelle 9.1: Faktor A in Abhängigkeit von den Versuchsparametern für Beanspruchungen $\tau_{vd} \leq 0,7 \tau_{vu}$, $t_0 \geq 35$ Tage

f_R	0,095	0,082	0,065
zentrische Lage	0,021	0,044	0,073
Randlage 2 ds	-	0,094	-
Randlage 1 ds	-	0,109	-
Ecklage 2 ds	-	0,098	-

Da man mit dem Ansatz von Franke die vorausgesetzte Linearität der $\varphi_V(t)$ -t-Kurven nicht bzw. erst ab einer sehr hohen Belastungsdauer erreicht, geht Svensvik /4/ von einem geradlinigen Verlauf der $\varphi_V(t)$ -t-Werte im doppellogarithmischen Maßstab aus, d.h. er setzt:

$$\log \varphi_V(t) = \log n + m \log t \quad (9.9)$$

Zur Ableitung einer Kriechfunktion nutzt Svensvik die Tatsache, daß eine Gerade im doppellogarithmischen Maßstab einer Parabel im doppellinearen Maßstab entspricht. Er erhält damit

$$\varphi_V(t) = n \cdot t^m \quad (9.10)$$

Nachrechnungen von Versuchsergebnissen zeigen nach Svensvik's Angaben, daß das beobachtete Verhalten durch diesen Ansatz gut be-

schreibbar ist, wenn zur Berechnung der Faktoren m und n die Versuchswerte erst ab etwa 100 h berücksichtigt werden. Dann wird auch das im Versuch beobachtete Verhalten bei $t \leq 100$ h gut erfaßt.

Beim Vergleich der im Versuch ermittelten $\varphi_V(t)$ - t -Werte und den nach Gleichung 9.10 berechneten Kriechzahlen in /4/ fällt auf, daß Svensvik Versuchswerte erst ab $t \geq 1$ h angibt. Bei den Versuchen von Svensvik und bei den hier beschriebenen Untersuchungen ergibt sich ein näherungsweise linearer $\varphi_V(t)$ - t -Verlauf etwa ab $t \geq 1$ h. Eine erhebliche Abweichung vom geradlinigen Verlauf der $\varphi_V(t)$ -Werte ist insbesondere bei in jungem Alter belasteten Versuchskörpern zu verzeichnen. Die von Svensvik erzielte gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Versuch bei Berücksichtigung der Versuchswerte ab $t \geq 100$ h ist z.T. auch darauf zurückzuführen, daß zur Bestimmung der Ausgleichsgeraden keine gleichmäßige Verteilung der Versuchswerte über die Belastungsdauer vorliegt (Versuchsergebnisse sind insbesondere für hohe Belastungsdauern vorhanden). Der Vergleich der bei den hier beschriebenen Versuchen bestimmten Kriechzahlen und der mit dem Ansatz 9.10 von Svensvik berechneten Werte zeigt damit erwartungsgemäß, daß die tatsächlichen Kriechzahlen für $t < 1$ h unterhalb des berechneten geradlinigen Verlaufs liegen (siehe Anlage 136).

10. OFFENE FRAGEN

Nach Abschluß der noch ausstehenden Versuche ist der Einfluß der Parameter, die das Verbundkriechverhalten unter konstanter Dauerlast maßgeblich bestimmen, experimentell im wesentlichen geklärt. Ob die Annahme einer von der Beanspruchungshöhe unabhängigen Kriechfunktion - zumindest für niedrige Beanspruchungen - zulässig ist, konnte durch die Versuche jedoch nicht befriedigend nachgewiesen werden. Da zur Diskussion dieses Einflusses Versuchsergebnisse aus verschiedenen Serien verglichen wurden, soll der Einfluß des Beanspruchungsniveaus an Ausziehkörpern einer Serie nochmals untersucht werden.

Die Anpassung der bestehenden Verbundkriechgesetze von Franke /3/ und Svensvik /4/ an die Versuchsergebnisse muß dann eingehender überprüft werden. Dabei muß auch die Erfassung von Spannungsänderungen berücksichtigt werden (Klärung der Gültigkeit von Superpositionsprinzipien). Ziel der weiteren Arbeit ist es, die experimentell gefundenen Abhängigkeiten in einem Verbundkriechgesetz zu formulieren.

LITERATURVERZEICHNIS

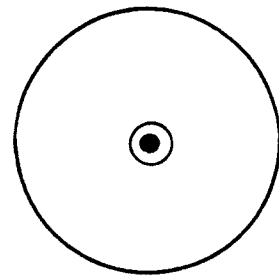
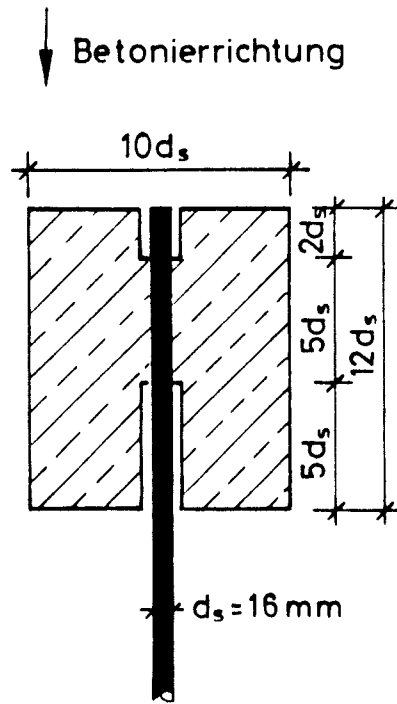
- /1/ RILEM/CEB/FIP: Bond Test for Reinforcing Steel. I. Beam Test, II. Pull-out-Test, RILEM 3, No. 15, 1970
- /2/ Sager, H.: Zum Einfluß hoher Temperaturen auf das Verbundverhalten von einbetonierten Bewehrungsstäben. Dissertation, TU Braunschweig 1984
- /3/ Franke, L.: Einfluß der Belastungsdauer auf das Verbundverhalten von Stahl in Beton (Verbundkriechen); DAFStb, Heft 268, 1976
- /4/ Svensvik, B.: Zum Verformungsverhalten gerissener Stahlbetonbalken unter Einschluß der Mitwirkung des Betons auf Zug in Abhängigkeit von Last und Zeit; Dissertation, TU Braunschweig, 1981
- /5/ Martin, H., Janovic, K.: Einfluß der Konsistenz und der Dauerlast auf das Verbundverhalten von Stahl in Leichtbeton. Lehrstuhl und Institut für Massivbau, TH München, Bericht Nr. 2344, 1970
- /6/ Martin, M., Noakowski, P.: Verbundverhalten von Betonstählen. Untersuchung auf der Grundlage von Ausziehversuchen. DAFStb, Heft 319, 1981

T E I L I
A N L A G E N

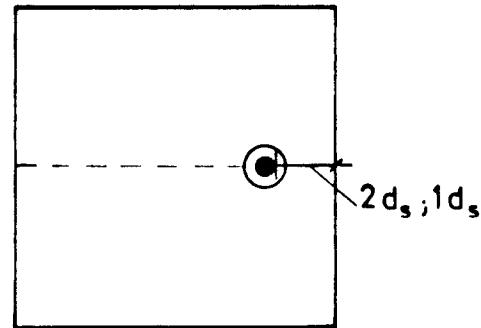
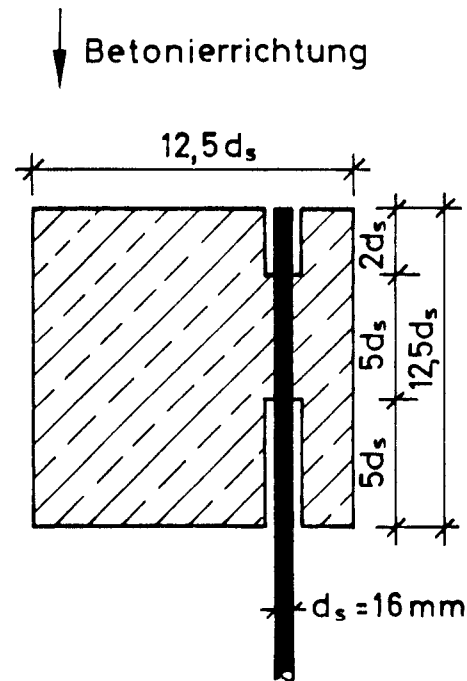
Zusammenstellung der Versuchsvariablen bei den Dauerstandversuchen

Betonier- serie	Stahlgüte f_R	Betongüte	Lastniveau τ_{vd}/τ_{vu}	weitere Variable
AKZ2	BSt III U 0,082	B 25	0,41 0,66	
AKZ3	BSt III K 0,095	B 25	0,63	
AKZ4	BSt III U 0,082	B 55	0,31 0,65 0,82	
AKZ6	BSt III U 0,082	B 25	0,46/0,72 0,72/0,46 0,46 0,72	
AKZ7	BSt III U 0,082	B 55	0,90 0,93	
AKZ8	BSt III U 0,082	B 55	0,50 0,67	$t_0=10d$, 145d,421d
AKZ9	BSt III U 0,082	B 25	0,66 0,85	$t_0=14d$, 117d H0Z
AKZ10	BSt III U 0,082	B 25	0,70	
AKZ11	BSt III U 0,082	B 55	0,50/0,30 0,30/0,50 0,50 0,85	
AKZ12	BSt III U 0,065	B 25	0,70	
AKZ13	BSt III U 0,082	B 25	0,85 0,90 0,93 0,96	
AKZ15	BSt III U 0,082	B 25	0,50 0,66 0,94	H0Z

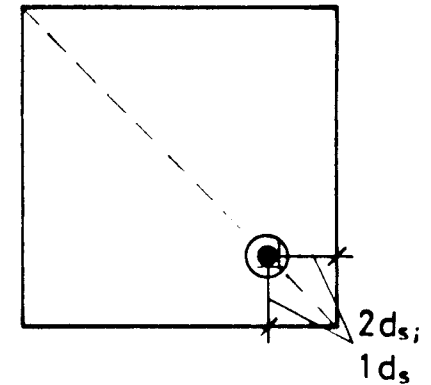
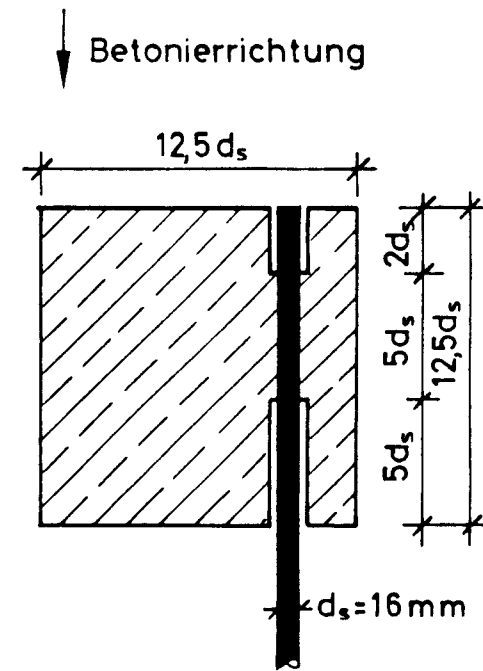
Betonier- serie	Stahlgüte f_R	Betongüte	Lastniveau τ_{vd}/τ_{vu}	weitere Variable
AKZ18	BSt III U 0,082	B 25	0,85 0,90 0,93 0,96	
AKZ19	BSt III U 0,065	B 55	0,70	$t_0=13d$
AKZ20	BSt III U 0,082	B 25	0,70	$l_v=3 \text{ ds}$
AKZ21	BSt III U 0,065	B 55	0,70	$l_v=3 \text{ ds}$
AKZ22	BSt III U 0,072	B 25	0,50 0,70	
AKE1	BSt III U 0,065	B 25	0,50 0,67	c (Randlage) zentrisch, c = 1 ds, 2 ds
AKE2	BSt III U 0,065	B 25	0,50 0,67	c (Ecklage) zentrisch, c = 1 ds, 2 ds
AKE4	BSt III U 0,072	B 25	0,50	c (Randlage, Ecklage) c = 1 ds, 2 ds



Zylindrischer Auszieh-
körper mit zentrischer
Stablage



Quadratische Ausziehkörper mit exzentrischer Stablage
Randlage



Ecklage

Zusammensetzung der verwendeten Betone

		AKZ2	AKZ3	AKZ4	AKZ6	AKZ7	AKZ8	AKZ9	AKZ10	AKZ11
Zementgehalt	kg/m ³	233	230	395	236	397	398	238	242	389
Zuschlaggehalt	kg/m ³	1912	1836	1763	1886	1771	1775	1913	1936	1777
Wassergehalt	kg/m ³	215	212	206	218	207	207	219	212	214
W/Z-Wert	-	0,92	0,92	0,52	0,92	0,52	0,52	0,92	0,88	0,55
Verdichtungsmaß	-	1,04	1,03	1,13	1,02	1,05	1,04	1,01	1,08	1,04
Ausbreitmaß	cm	42,0	43,0	36,0	44,0	42,0	41,0	48,0	41,5	38,5
Frischbeton- rohdichte	kg/m ³	2,36	2,35	2,36	2,34	2,37	2,38	2,37	2,39	2,38

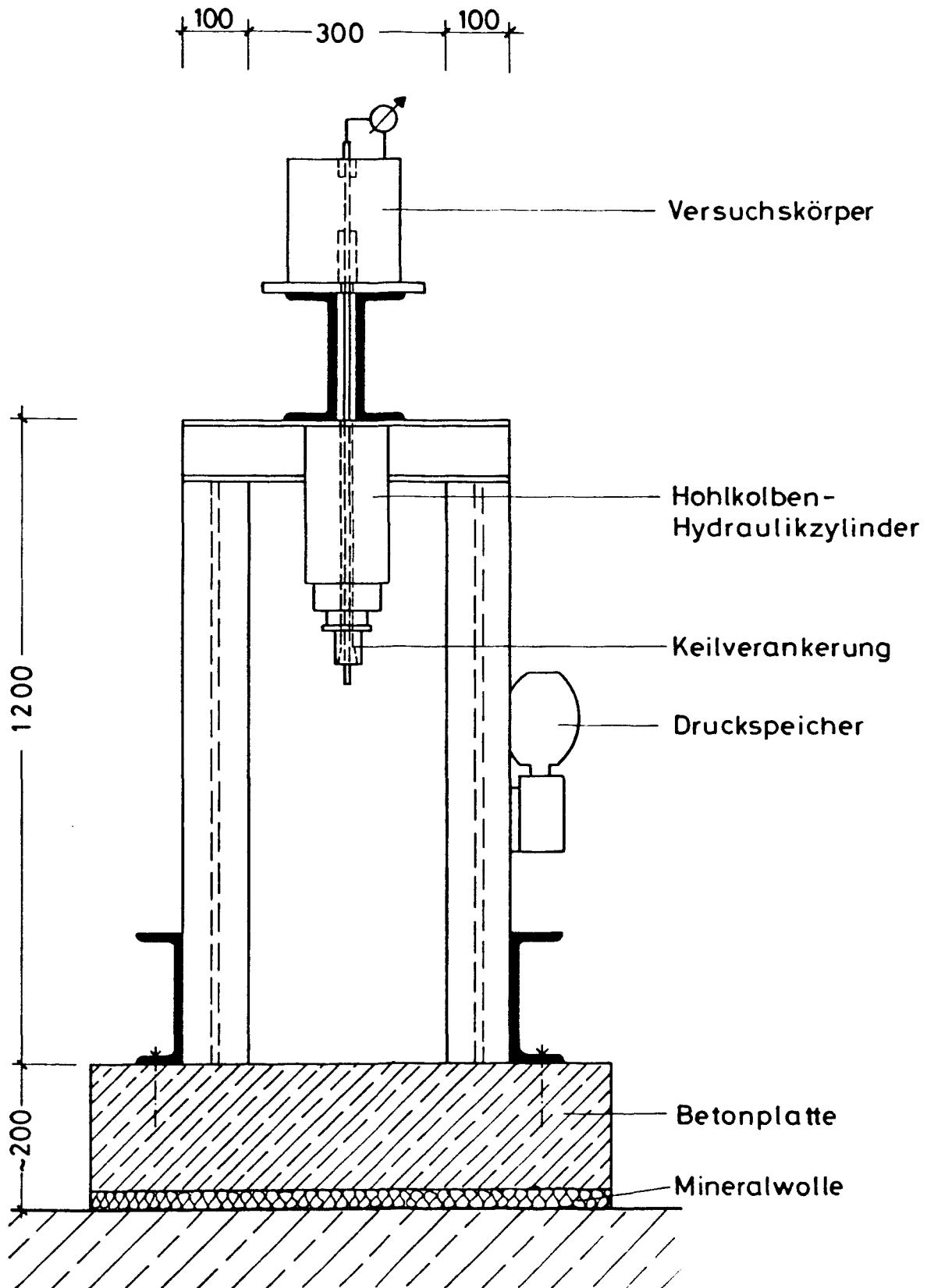
		AKZ12	AKZ13	AKZ15	AKZ17	AKZ18	AKZ19	AKZ20	AKZ21	AKZ22
Zementgehalt	kg/m ³	240	240	251	252	242	386	248	380	261
Zuschlaggehalt	kg/m ³	1920	1920	1910	1918	1846	1827	1904	1800	1934
Wassergehalt	kg/m ³	210	210	219	220	212	178	217	190	209
W/Z-Wert	-	0,88	0,88	0,87	0,87	0,88	0,46	0,88	0,50	0,80
Verdichtungsmaß	-	1,06	1,08	1,05	1,05	1,04	1,18	1,06	1,20	1,12
Ausbreitmaß	cm	41,0	40,5	39,0	40,0	40,5	32,0	40,0	34,0	35,5
Frischbeton- rohdichte	kg/m ³	2,38	2,37	2,38	2,39	2,39	2,39	2,37	2,40	2,40

		AKZ23	AKZ24	AKZ25	AKE1	AKE2	AKE4	AKE6	AKE8	AKE9	AKE10
Zementgehalt	kg/m ³	259	260	251	253	248	252	240	249	249	255
Zuschlaggehalt	kg/m ³	1914	1922	1927	1940	1908	1868	1919	1915	1915	1884
Wassergehalt	kg/m ³	207	208	212	208	214	209	201	216	216	221
W/Z-Wert	-	0,80	0,81	0,85	0,82	0,86	0,83	0,84	0,87	0,87	0,87
Verdichtungsmaß	-	1,08	1,18	1,11	1,10	1,09	1,08	1,06	1,07	1,07	1,06
Ausbreitmaß	cm	37,5	32,5	36,0	34,5	36,0	36,0	41,0	34,0	34,0	35,5
Frischbeton- rohdichte	kg/m ³	2,38	2,39	2,39	2,40	2,37	2,38	2,36	2,38	2,38	2,36

Festigkeitskennwerte der verwendeten Betone

			AKZ2	AKZ3	AKZ4	AKZ6	AKZ7	AKZ8	AKZ9	AKZ10
Druckfestigkeit β_{w28}	N/mm ²		30,4	26,4	56,7	25,0	57,0	64,0	25,0	34,0
β_{wt0}	N/mm ²		30,5	28,0	54,0	29,0	59,0	58,0	17,0	39,0
Versuchsbeginn t_0	Tage		134	244	116	209	398	10	14	180
Spaltzugfestigkeit β_{sz}	N/mm ²		2,45	2,27	3,50	1,94	2,89	3,54	2,15	2,53
			AKZ11	AKZ12	AKZ13	AKZ15	AKZ17	AKZ18	AKZ19	AKZ20
Druckfestigkeit β_{w28}	N/mm ²		58,0	25,0	28,0	27,0	34,0	33,0	62,0	35,0
β_{wt0}	N/mm ²		64,0	32,0	30,0	30,0	32,0	31,0	53,0	37,0
Versuchsbeginn t_0	Tage		272	134	266	271	393	385	13	279
Spaltzugfestigkeit β_{sz}	N/mm ²		3,73	2,66	2,17	2,03	1,94	2,64	-	2,58

			AKZ21	AKZ22	AKZ23	AKZ24	AKZ25		
Druckfestigkeit β_{w28}	N/mm ²		57,0	36,0	33,0	37,0	34,0		
β_{wt0}	N/mm ²		61,0	42,0	-	39,0	31,0		
Versuchsbeginn t_0	Tage		102	264	-	89	14		
Spaltzugfestigkeit β_{sz}	N/mm ²		4,56	-	-	2,59	2,68		
			AKE1	AKE2	AKE4	AKE6	AKE8	AKE9	AKE10
Druckfestigkeit β_{w28}	N/mm ²		35,0	31,0	30,0	25,0	27,0	30,0	-
β_{wt0}	N/mm ²		38,0	31,0	32,0	29,0	32,0	-	-
Versuchsbeginn t_0	Tage		124	232	117	142	210	-	-
Spaltzugfestigkeit β_{sz}	N/mm ²		3,33	2,54	2,65	1,97	2,38	-	-



Schematische Darstellung des Verbundkriechstandes (Schnitt)

Ergebnisse der Kurzzeitversuche der unvorbelasteten zylindrischen
Ausziehkörper

Serie	Körper Nr.	τ_{vu} N/mm ²	$\tau_{vu}/\beta_w(t_o)$ -
AKZ2 $t_o=134d$	6	12,0	0,39
	8	10,9	0,36
	20	15,0	0,49
	Mittel	12,6	-
AKZ3 $t_o=225d$	6	12,3	0,44
	7	11,9	0,43
	11	11,8	0,42
	Mittel	12,0	-
AKZ4 $t_o=116d$	5	23,5	0,44
	10	23,1	0,43
	12	23,8	0,44
	Mittel	23,5	-
AKZ6 $t_o=209d$	17	12,4	0,43
	18	12,3	0,42
	19	10,1	0,35
	Mittel	11,6	-
AKZ7 $t_o=398d$	7	23,6	0,40
	11	23,2	0,39
	15	20,9	0,35
	Mittel	22,6	-
AKZ8 $t_o=10d$	1	22,8	0,39
	2	20,9	0,36
	3	21,1	0,36
	Mittel	21,6	-
AKZ8 $t_o=145d$	11	27,8	0,42
	13	28,6	0,43
	20	27,3	0,41
	Mittel	27,9	-
AKZ9 $t_o=14d$	1	8,4	0,49
	2	7,4	0,44
	3	8,1	0,48
	Mittel	8,0	-
AKZ9 $t_o=117d$	8	14,0	0,47
	9	12,7	0,42
	10	14,9	0,50
	Mittel	13,9	-

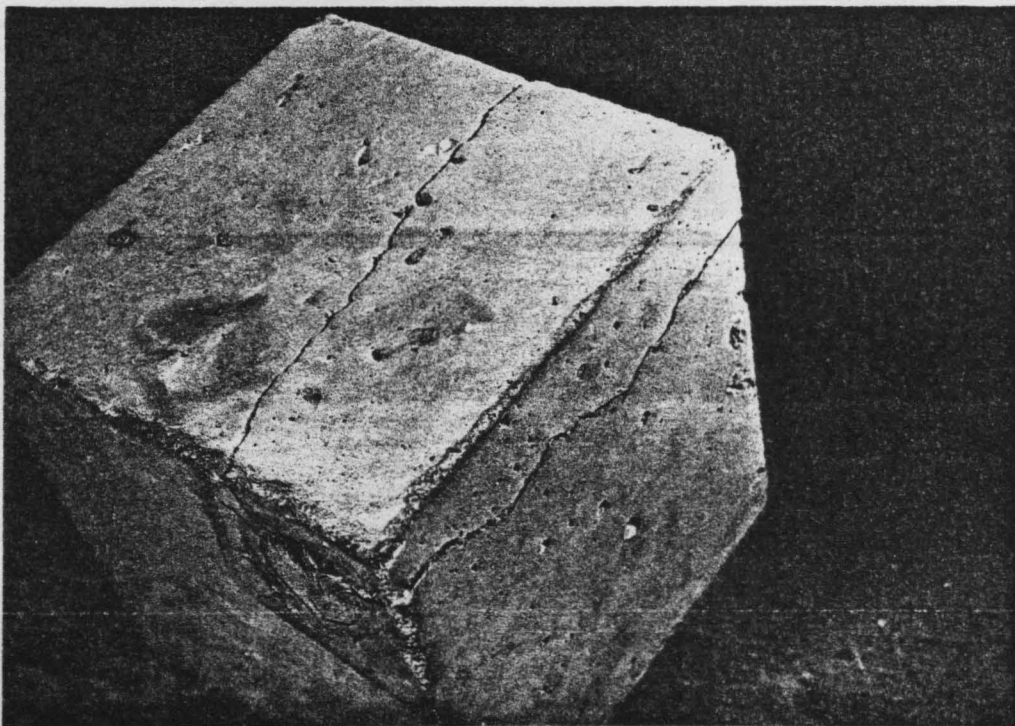
Serie	Körper Nr.	τ_{vu} N/mm ²	$\tau_{vu} / \beta_w(t_o)$ -
AKZ10 $t_o=180d$	1	18,2	0,47
	3	15,7	0,40
	11	18,0	0,46
	12	18,0	0,46
	Mittel	17,5	-
AKZ11 $t_o=272d$	1	28,8	0,45
	2	26,0	0,41
	3	28,0	0,44
	Mittel	27,6	-
AKZ12 $t_o=134d$	2	15,7	0,49
	4	17,0	0,53
	9	15,5	0,48
	17	13,1	0,41
	Mittel	15,3	-
AKZ13 $t_o=266d$	5	15,9	0,53
	8	13,3	0,44
	10	16,3	0,54
	Mittel	15,2	-
AKZ15 $t_o=271d$	1	15,2	0,51
	3	13,4	0,45
	6	14,0	0,47
	Mittel	14,2	-
AKZ18 $t_o=393d$	4	15,0	0,48
	5	16,5	0,53
	7	14,0	0,45
	Mittel	15,2	-
AKZ19 $t_o=13d$	1	21,2	0,40
	5	22,2	0,42
	6	22,3	0,42
	Mittel	21,9	-
AKZ20 $t_o=279d$	5	19,1	0,51
	10	17,5	0,47
	11	15,1	0,41
	Mittel	17,2	-
AKZ21 $t_o=102d$	1	29,9	0,49
	5	29,3	0,48
	15	30,3	0,50
	Mittel	29,8	-

Ergebnisse der Kurzzeitversuche der unvorbelasteten exzentrischen
Ausziehkörper

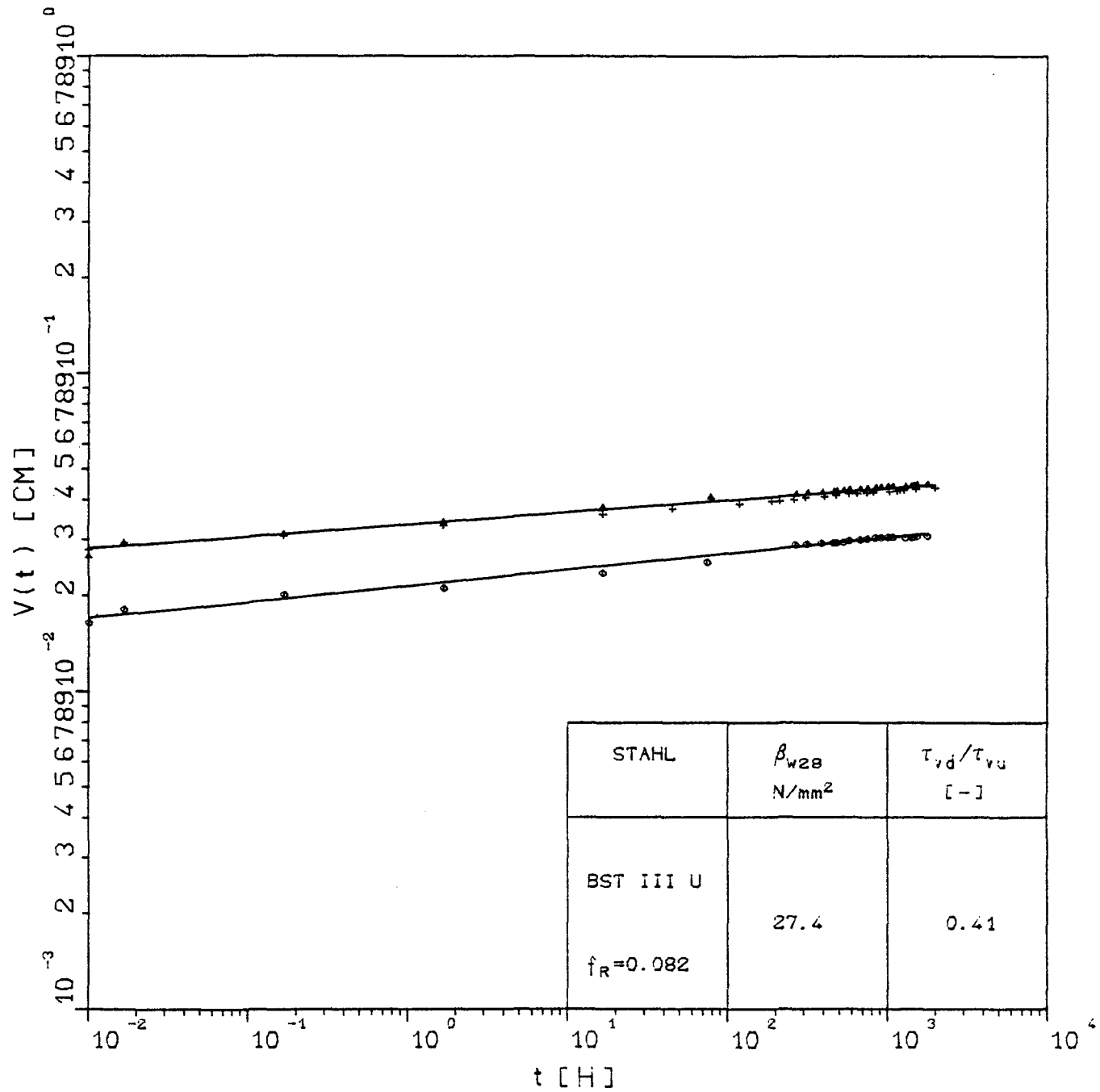
Serie	Körper Nr.	τ_{vu} N/mm ²	$\tau_{vu}/\beta_w(t_o)$ -
AKE1 $t_o=124d$ zentr.	3	18,0	0,47
	4	19,1	0,50
	7	17,9	0,47
	Mittel	18,3	-
AKE1 $t_o=124d$ 2 ds Randlage	1	14,6	0,38
	2	15,8	0,42
	3	14,6	0,38
	Mittel	15,0	-
AKE1 $t_o=124d$ 1 ds Randlage	1	12,6	0,33
	3	12,4	0,33
	5	13,1	0,34
	Mittel	12,7	-
AKE2 $t_o=232d$ zentr.	4	18,8	0,61
	5	16,2	0,52
	7	18,3	0,59
	Mittel	17,8	-
AKE2 $t_o=232d$ 2 ds Ecklage	2	11,2	0,36
	4	11,9	0,38
	6	12,2	0,39
	Mittel	11,8	-
AKE2 $t_o=232d$ 1 ds Ecklage	5a	3,4	0,11
	7	4,0	0,13
	5b	3,7	0,12
	Mittel	3,7	-
AKE4 $t_o=117d$ 2 ds Randlage	15	11,6	0,36
	16	12,1	0,38
	18	12,5	0,39
	Mittel	12,1	-
AKE4 $t_o=117d$ 1 ds Randlage	23	9,5	0,30
	24	9,7	0,30
	28	7,8	0,24
	Mittel	9,0	-



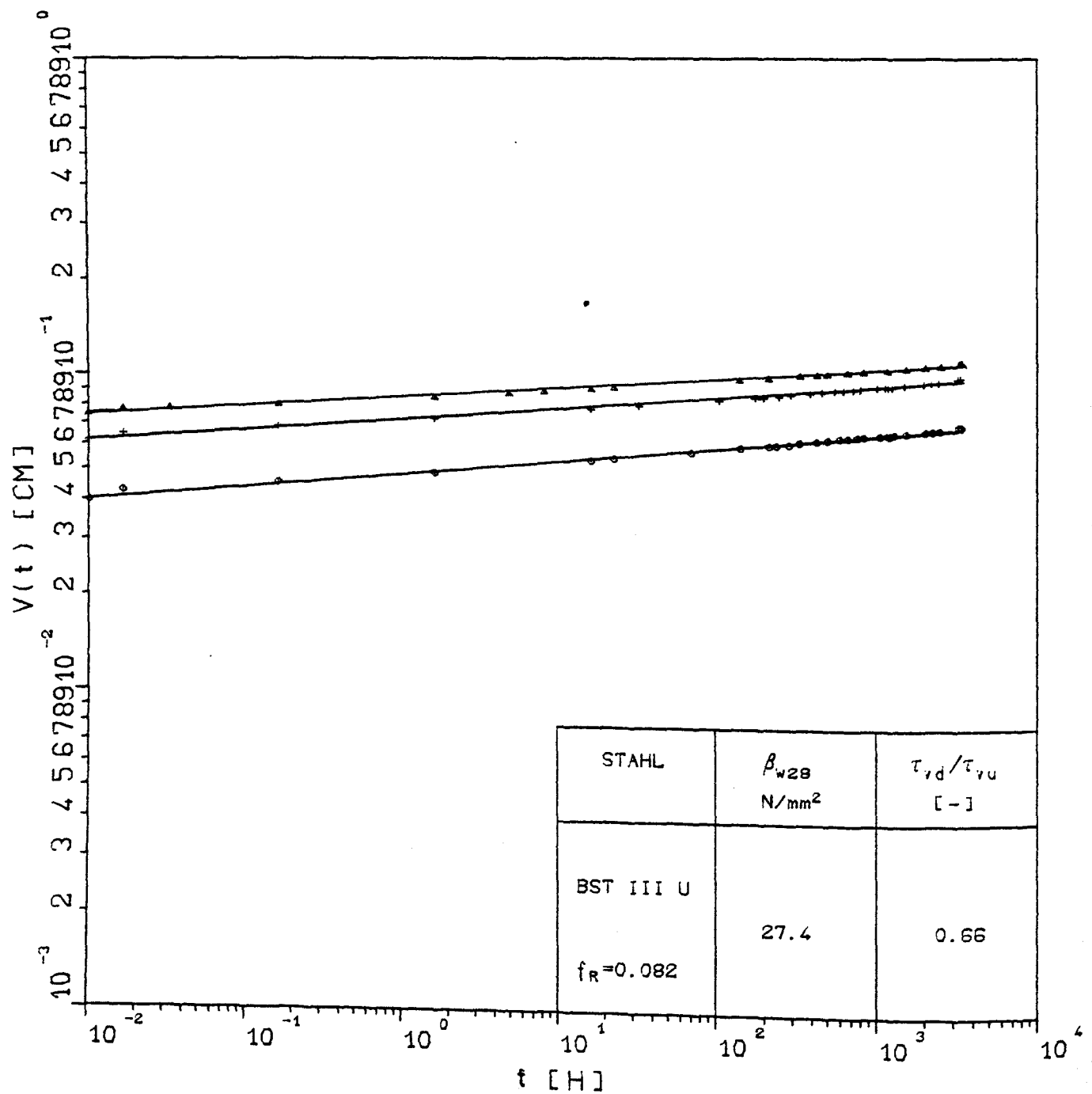
Bruchbild quadratischer Ausziehkörper, Randlage 2 ds



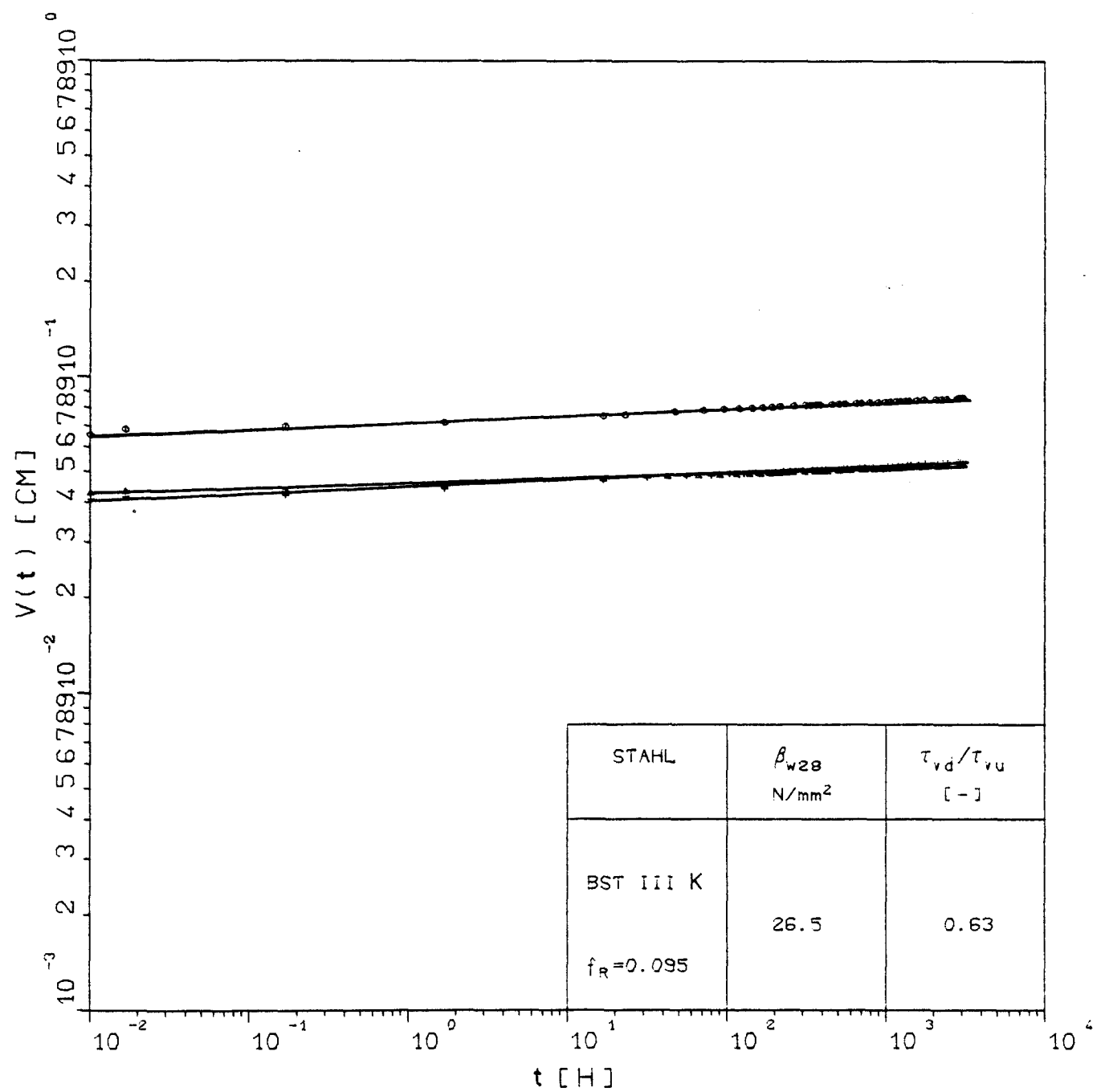
Bruchbild quadratischer Ausziehkörper, Ecklage 2 ds



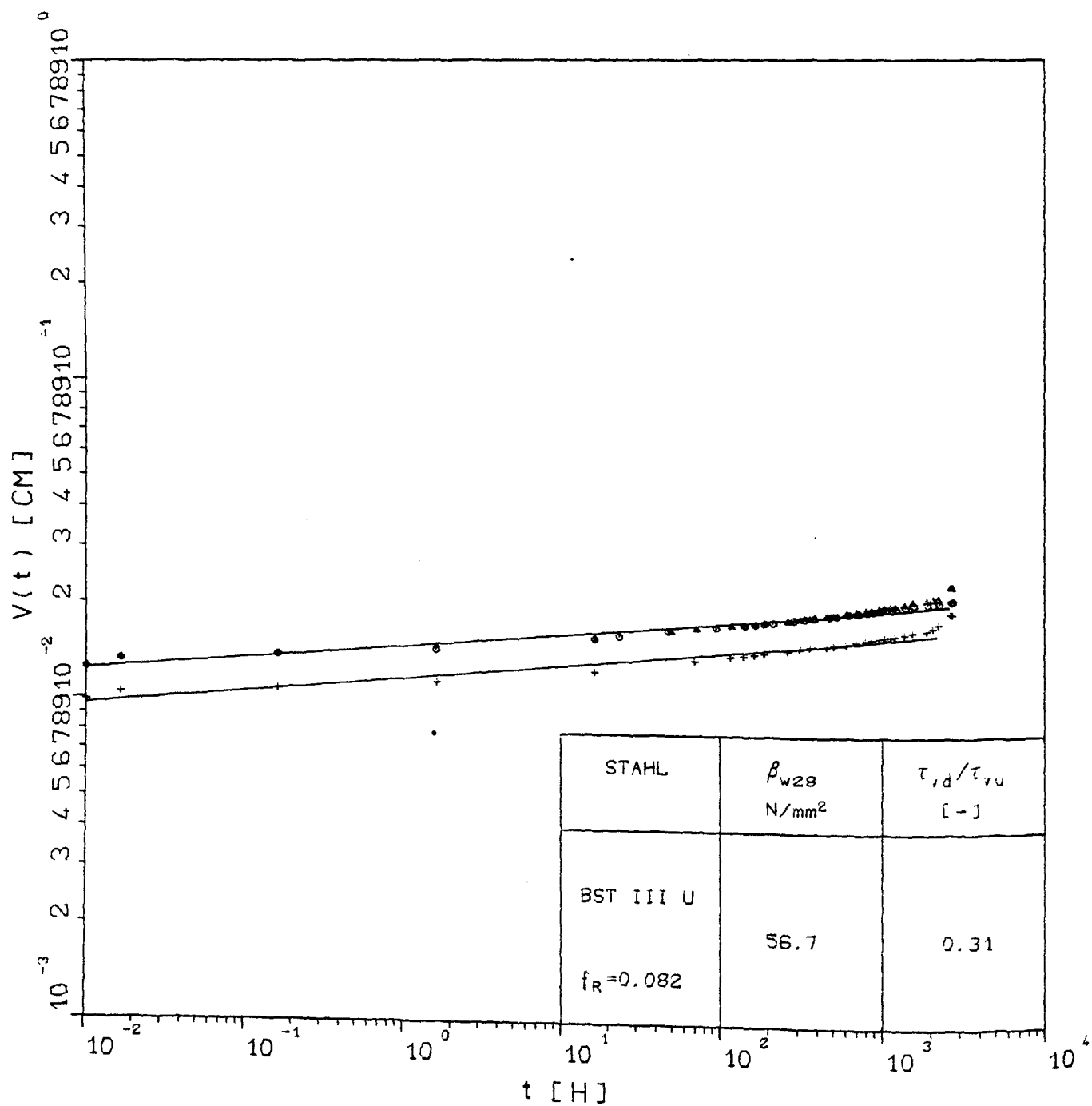
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ2.09, AKZ2.10 und AKZ2.16



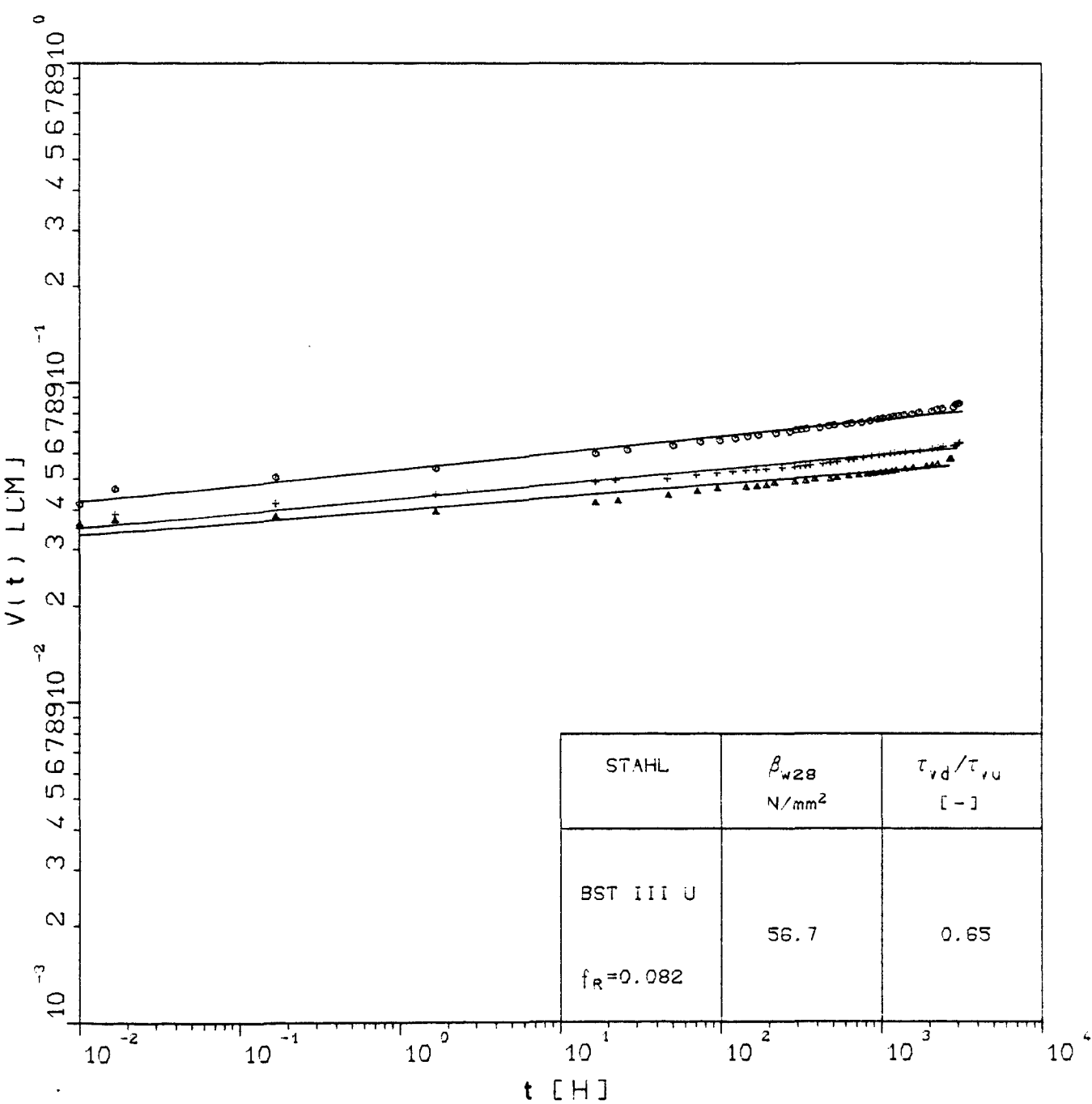
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ2.04, AKZ2.05 und AKZ2.15



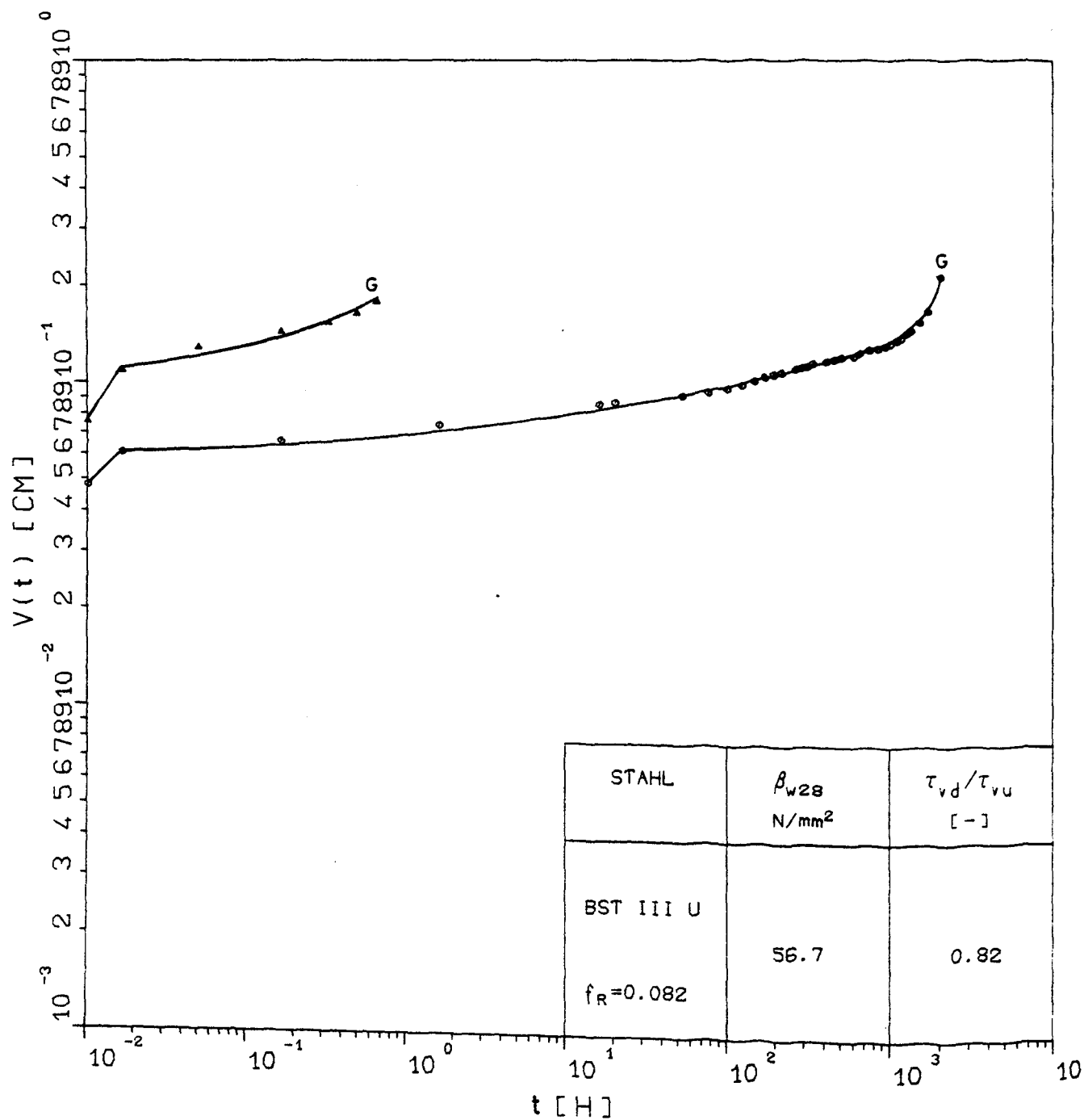
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ3.15, AKZ3.18 und AKZ3.20



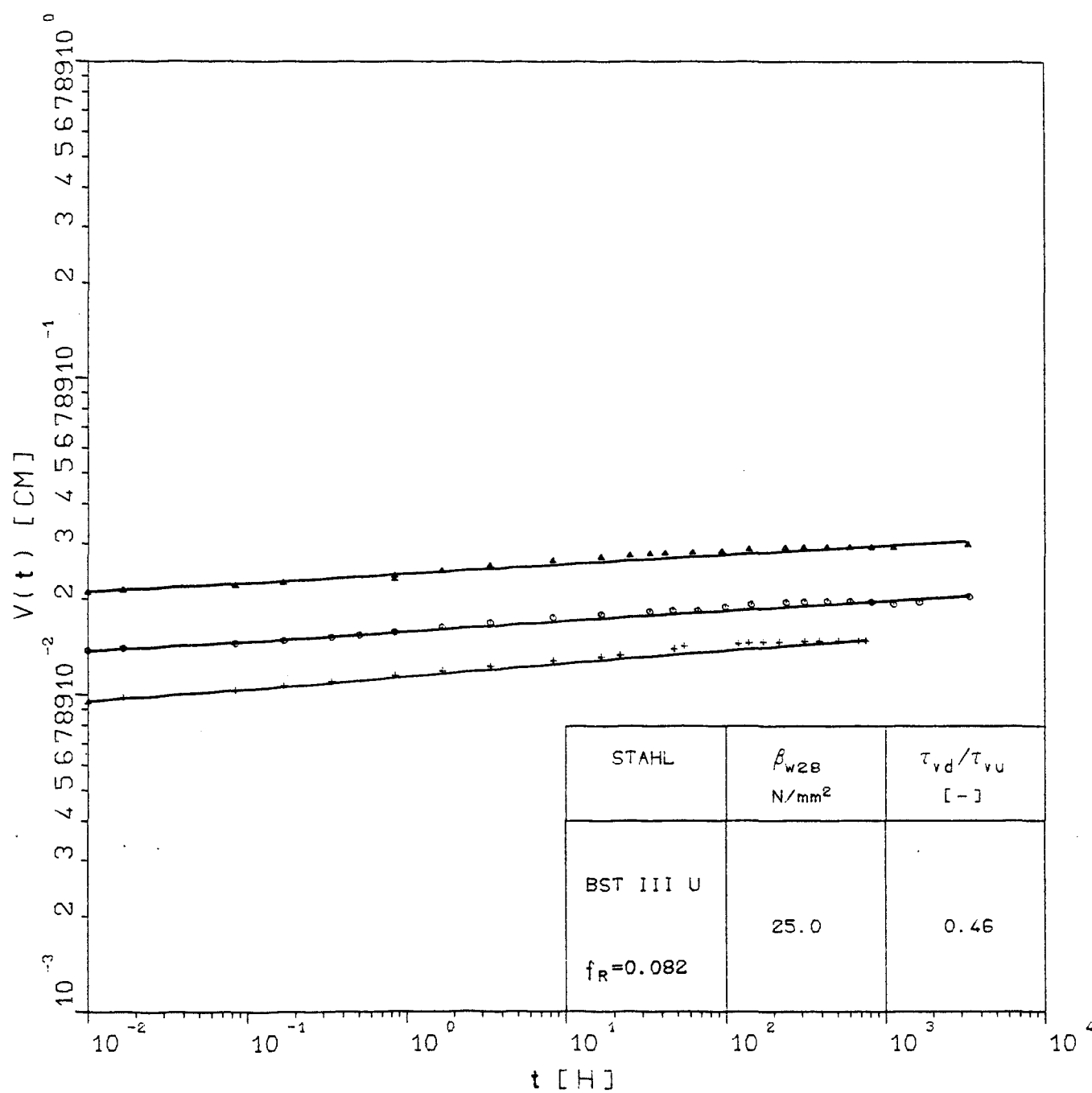
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ4.01, AKZ4.07 und AKZ4.13



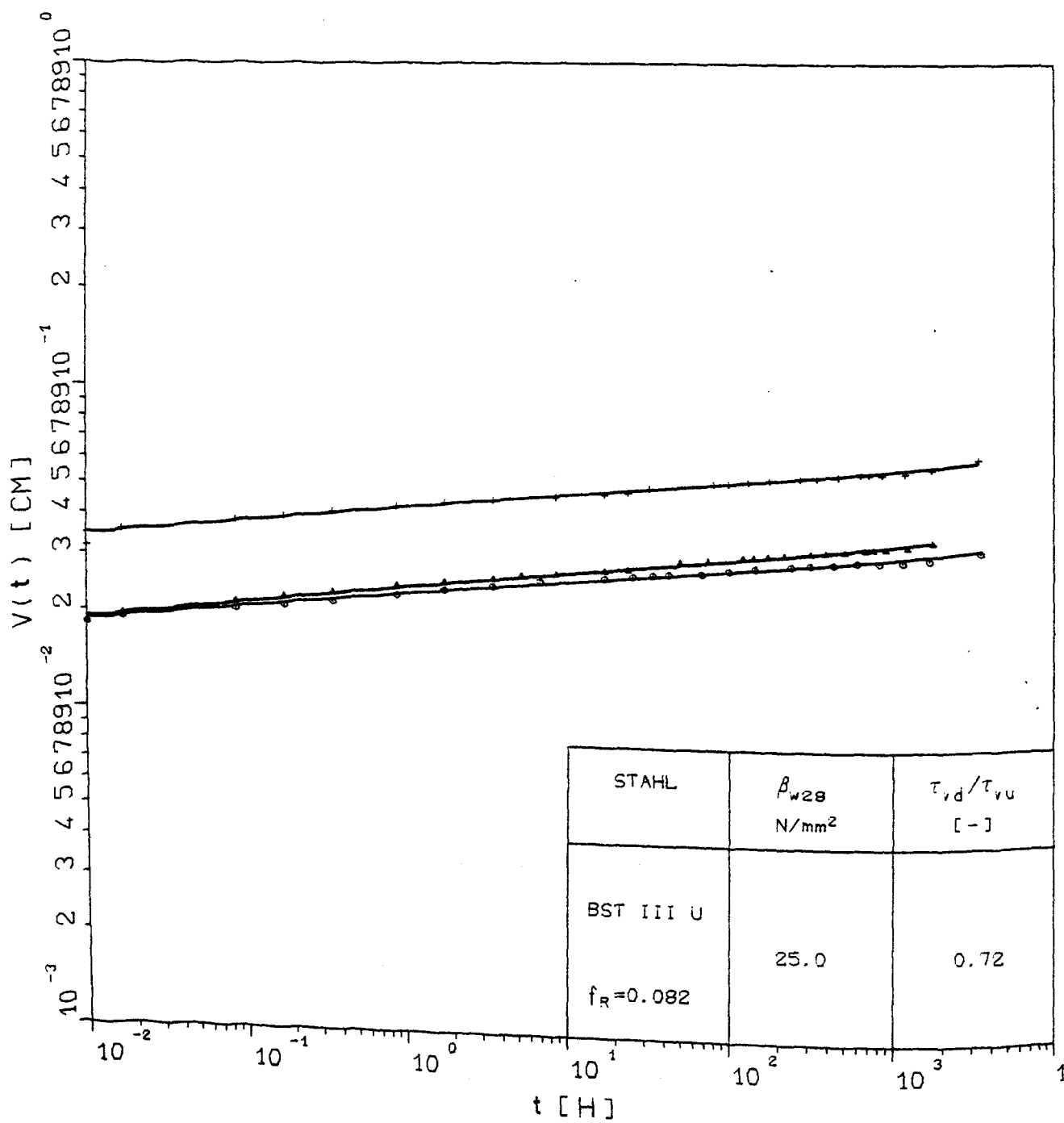
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ4.03, AKZ4.05 und AKZ4.08



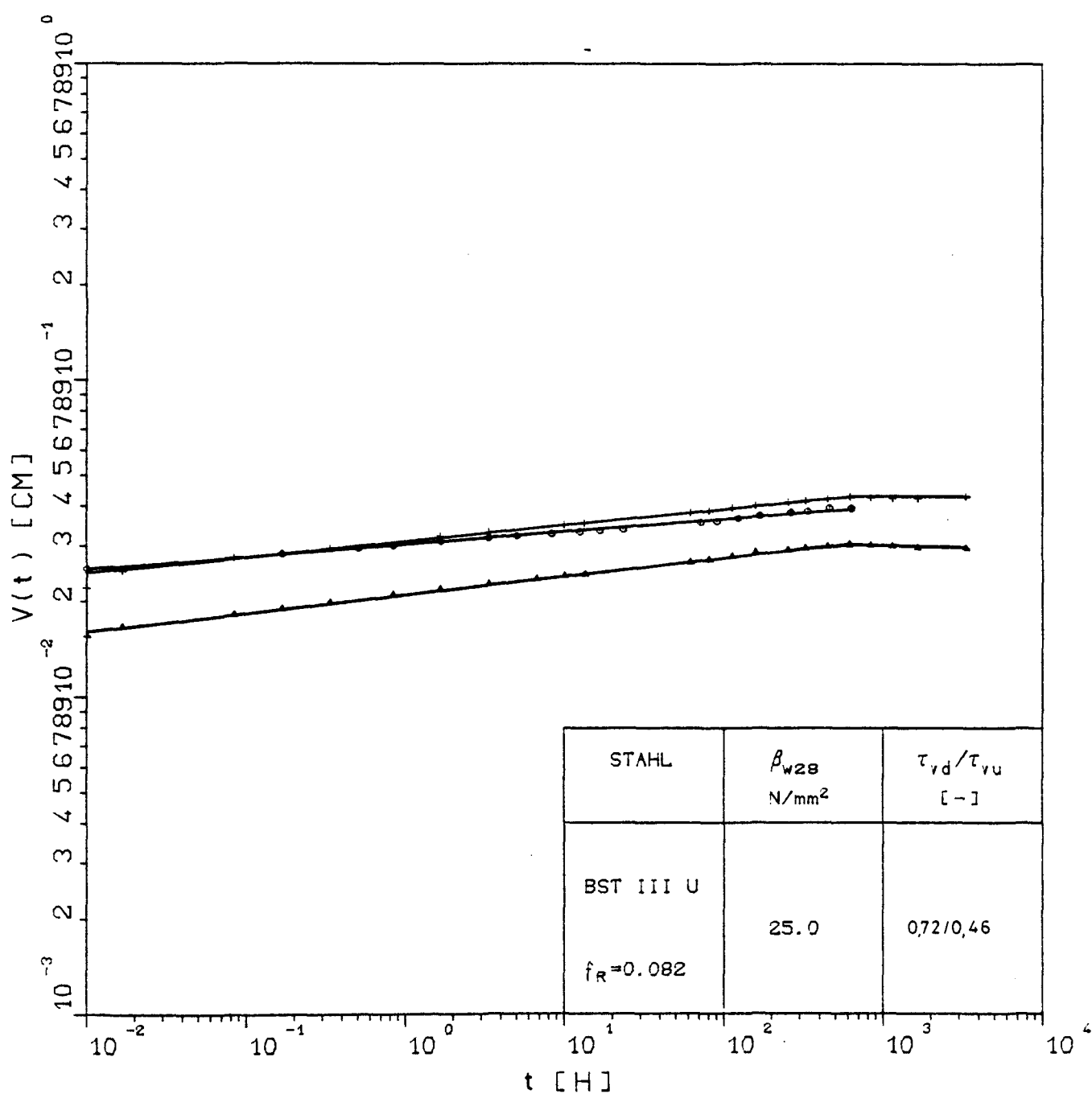
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ4.04 und AKZ4.14



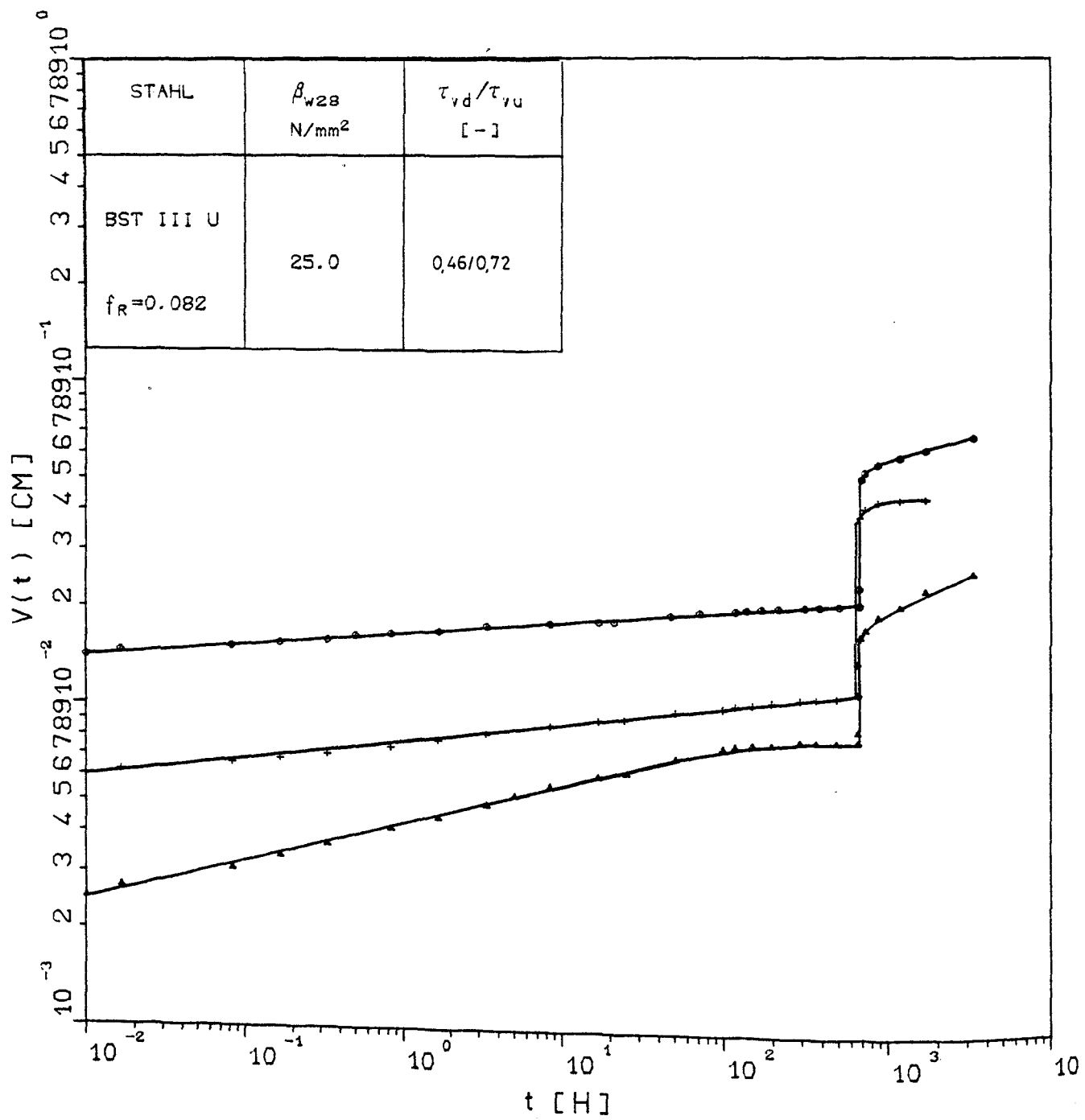
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ6.04, AKZ6.05 und AKZ6.12



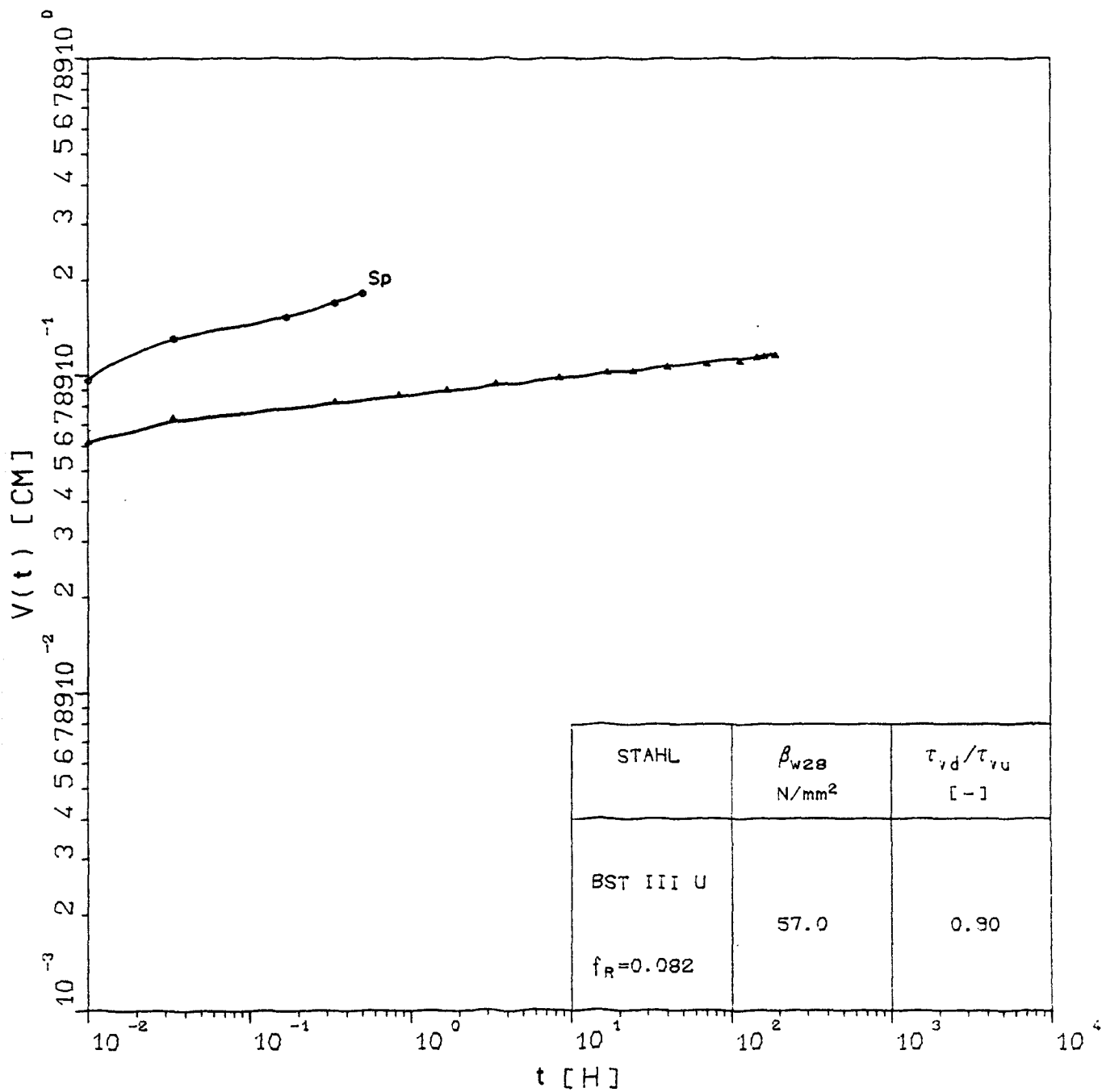
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ6.06, AKZ6.11 und AKZ6.15



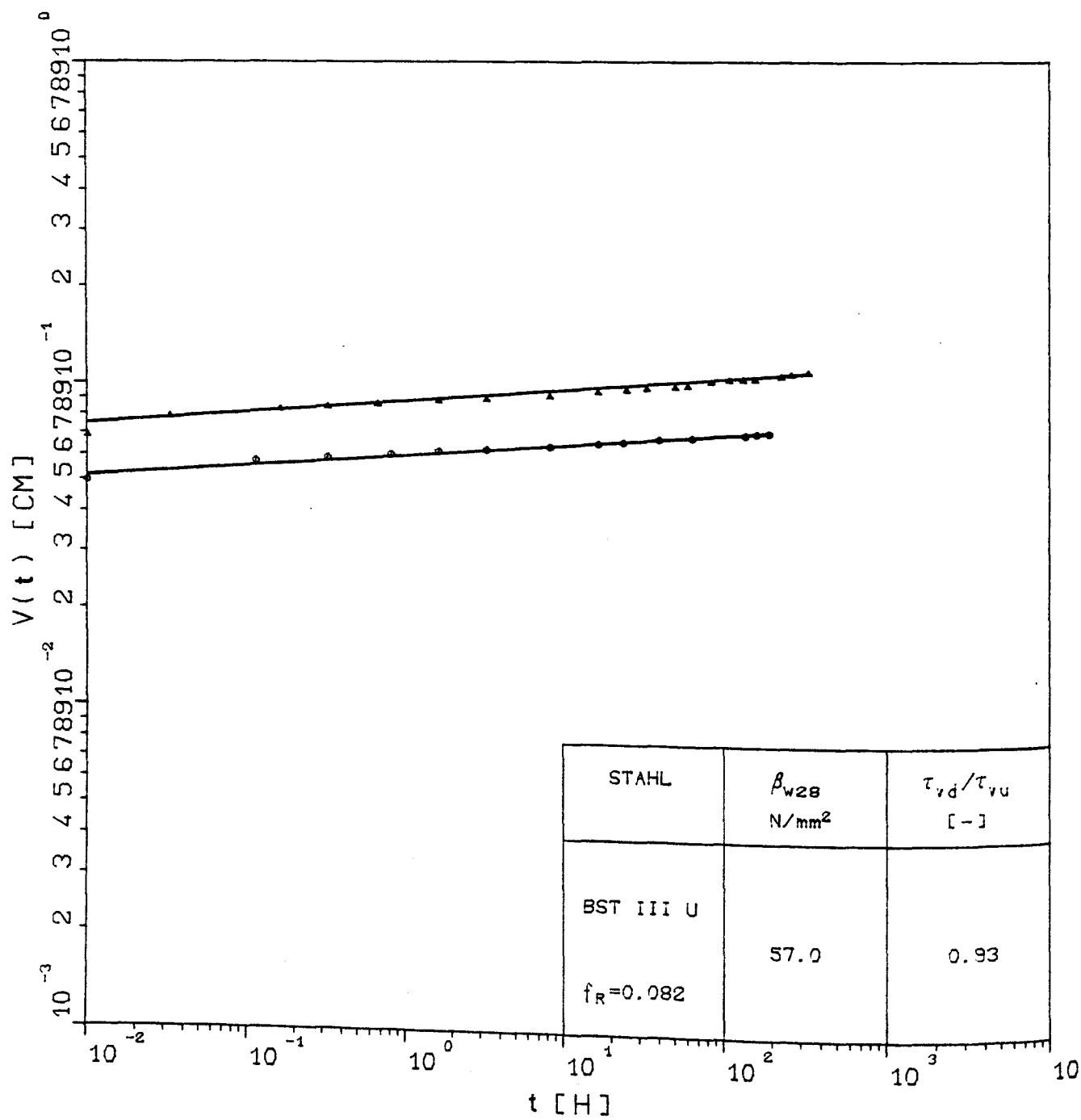
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ6.01, AKZ6.02 und AKZ6.03



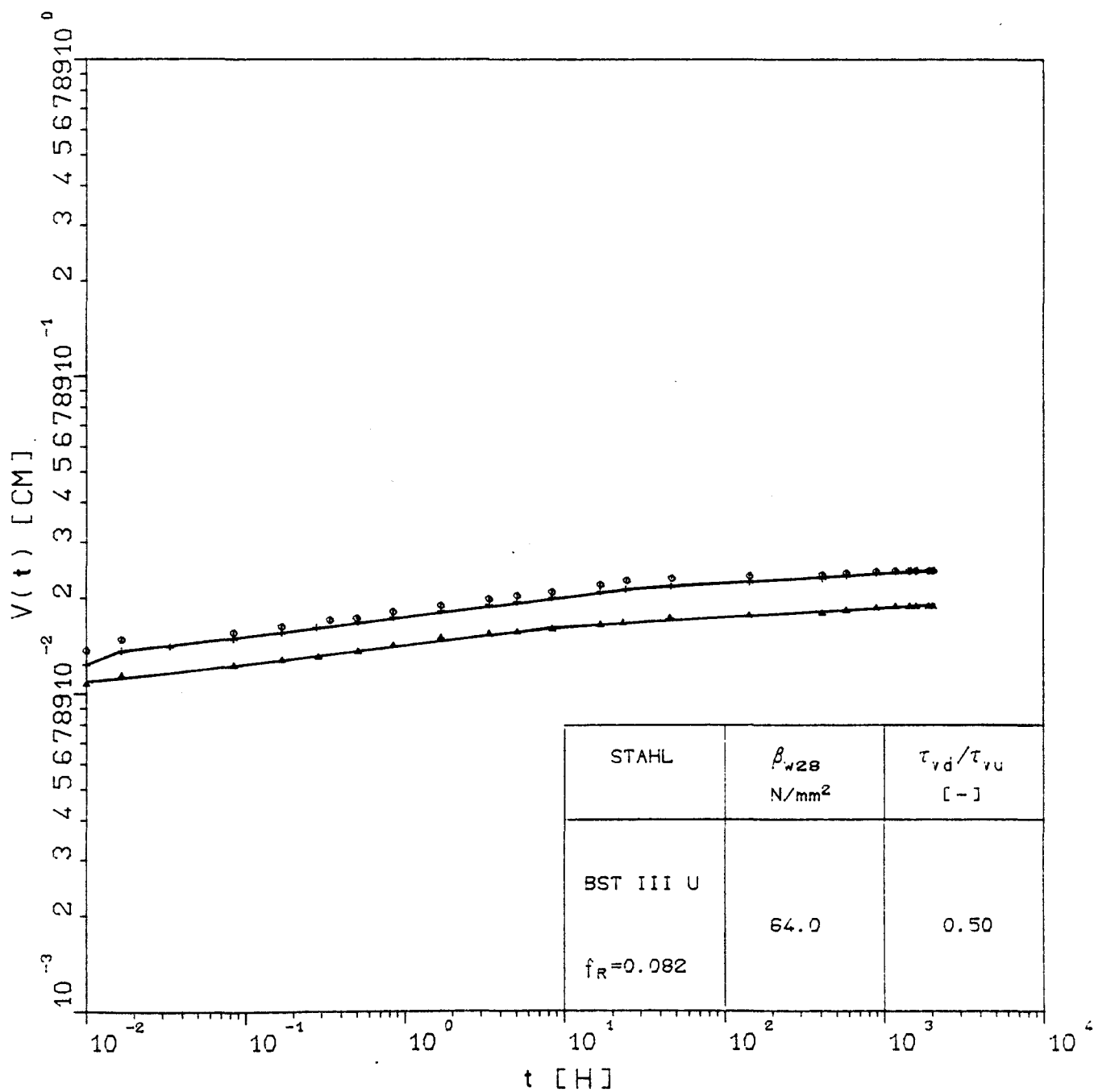
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ6.10, AKZ6.13 und AKZ6.14



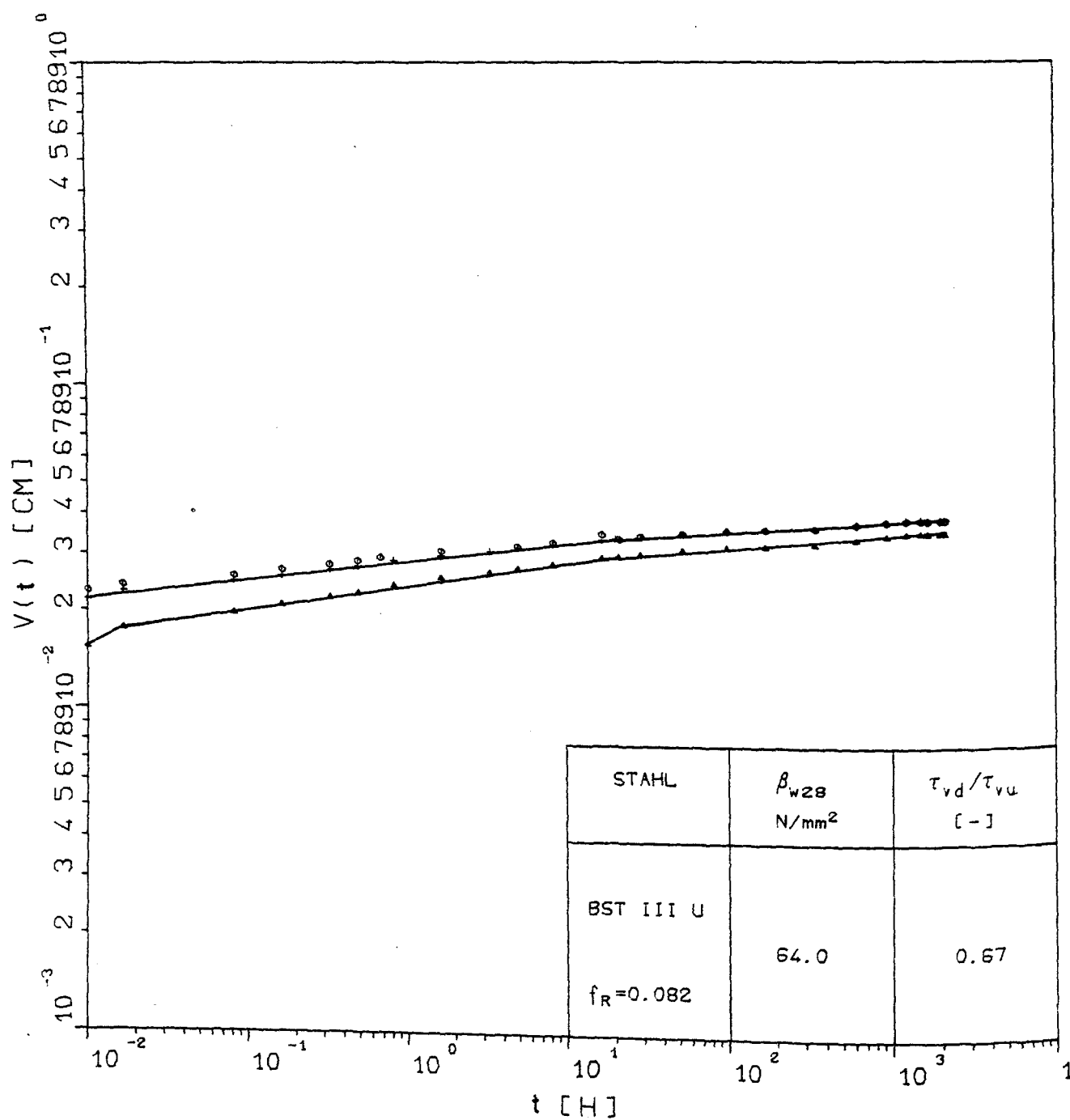
v(t)-t-Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ7.02 und AKZ7.08



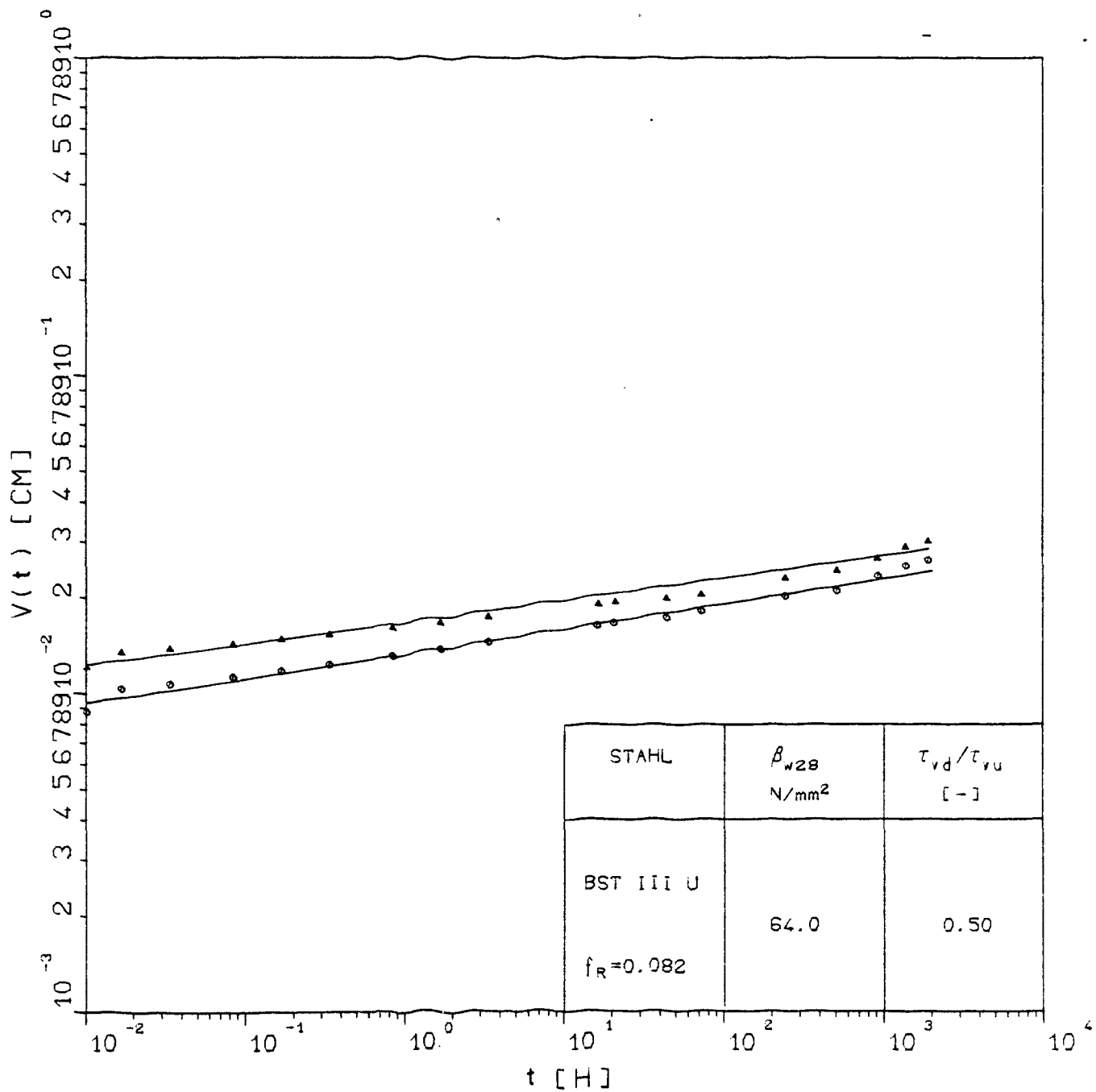
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ7.05 und AKZ7.14



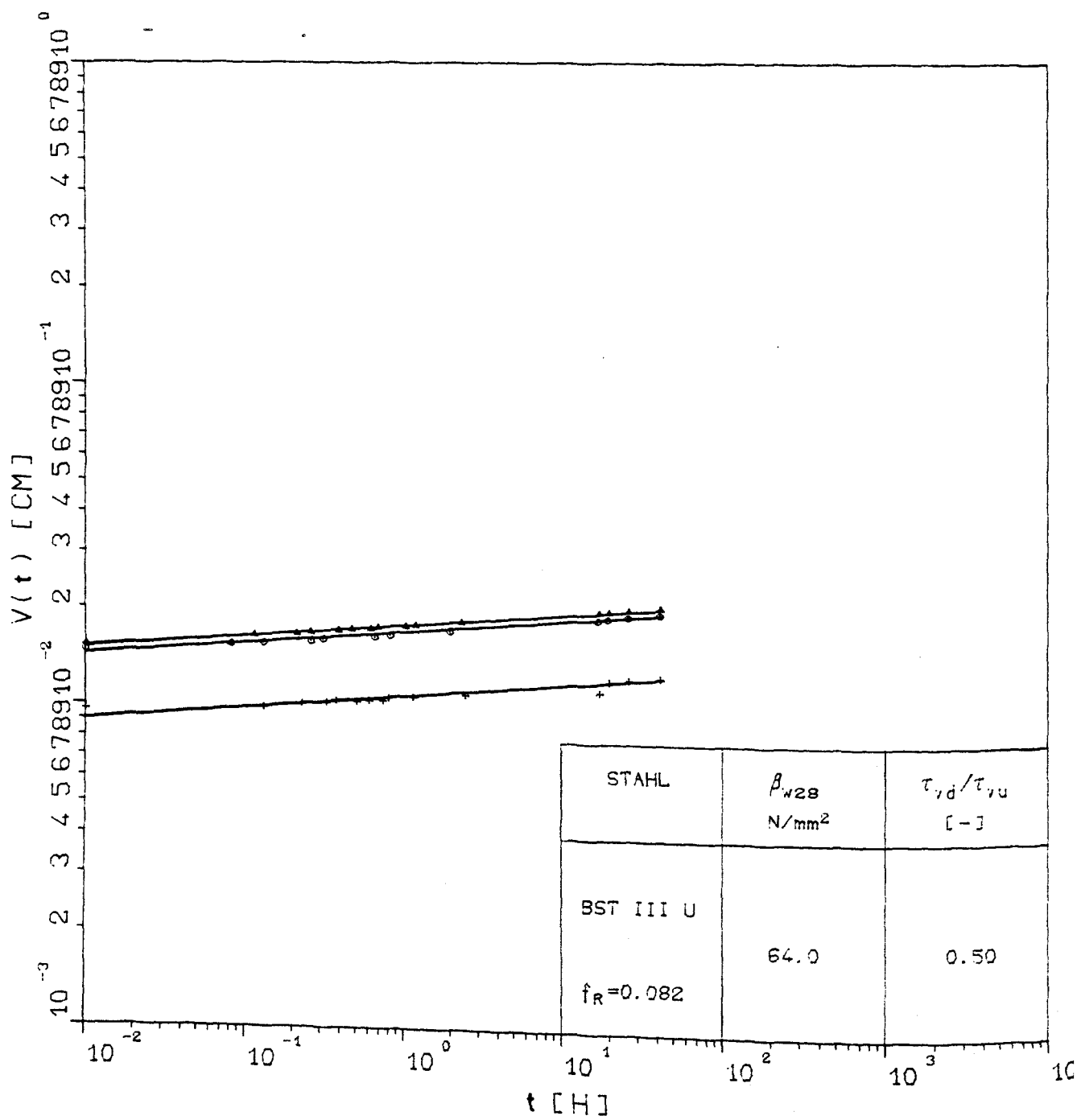
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ8.04, AKZ8.05 und AKZ8.06,
Belastungsalter $t_0=10d$



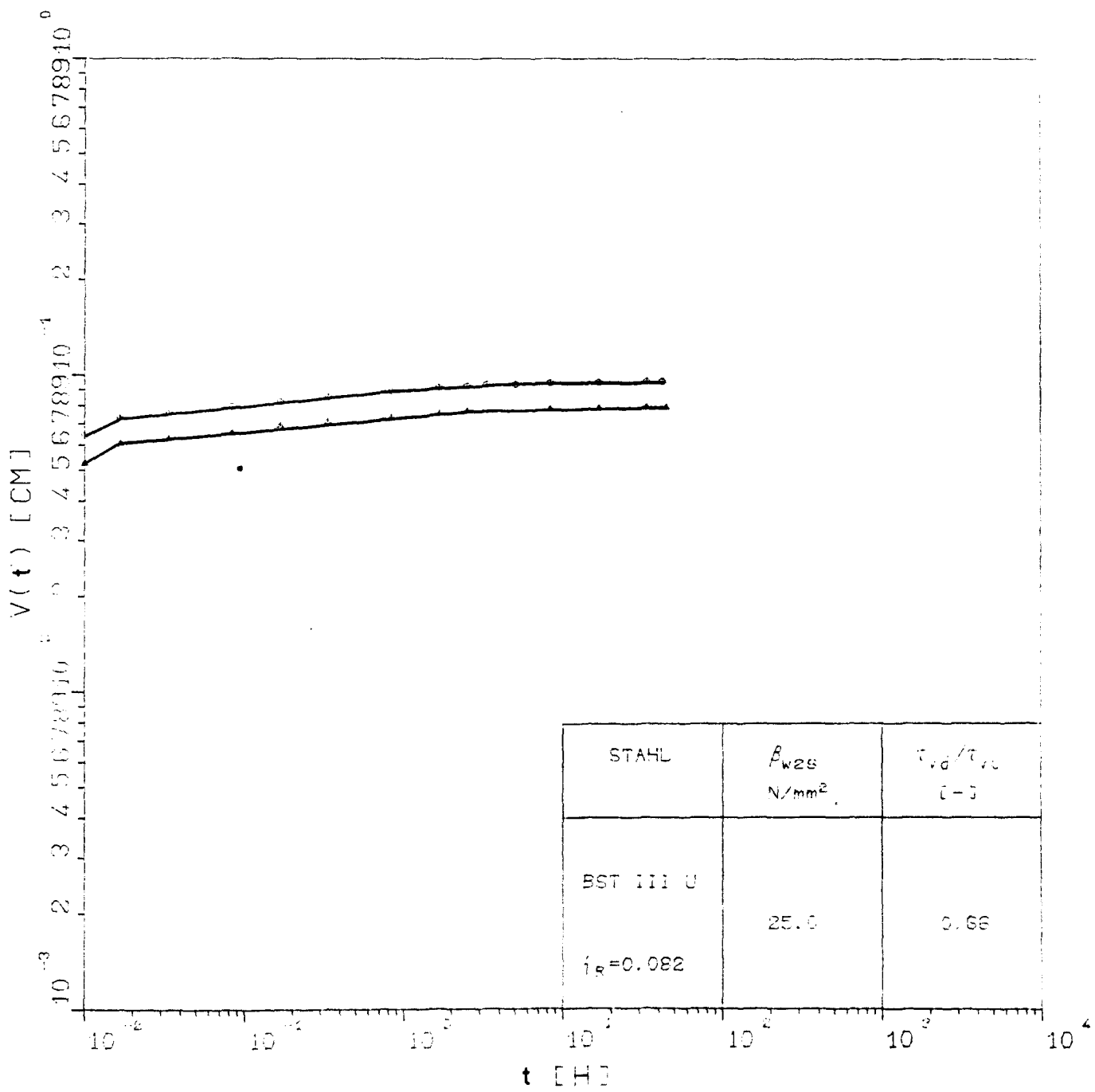
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ8.07, AKZ8.08 und AKZ8.09,
Belastungsalter $t_0=10d$



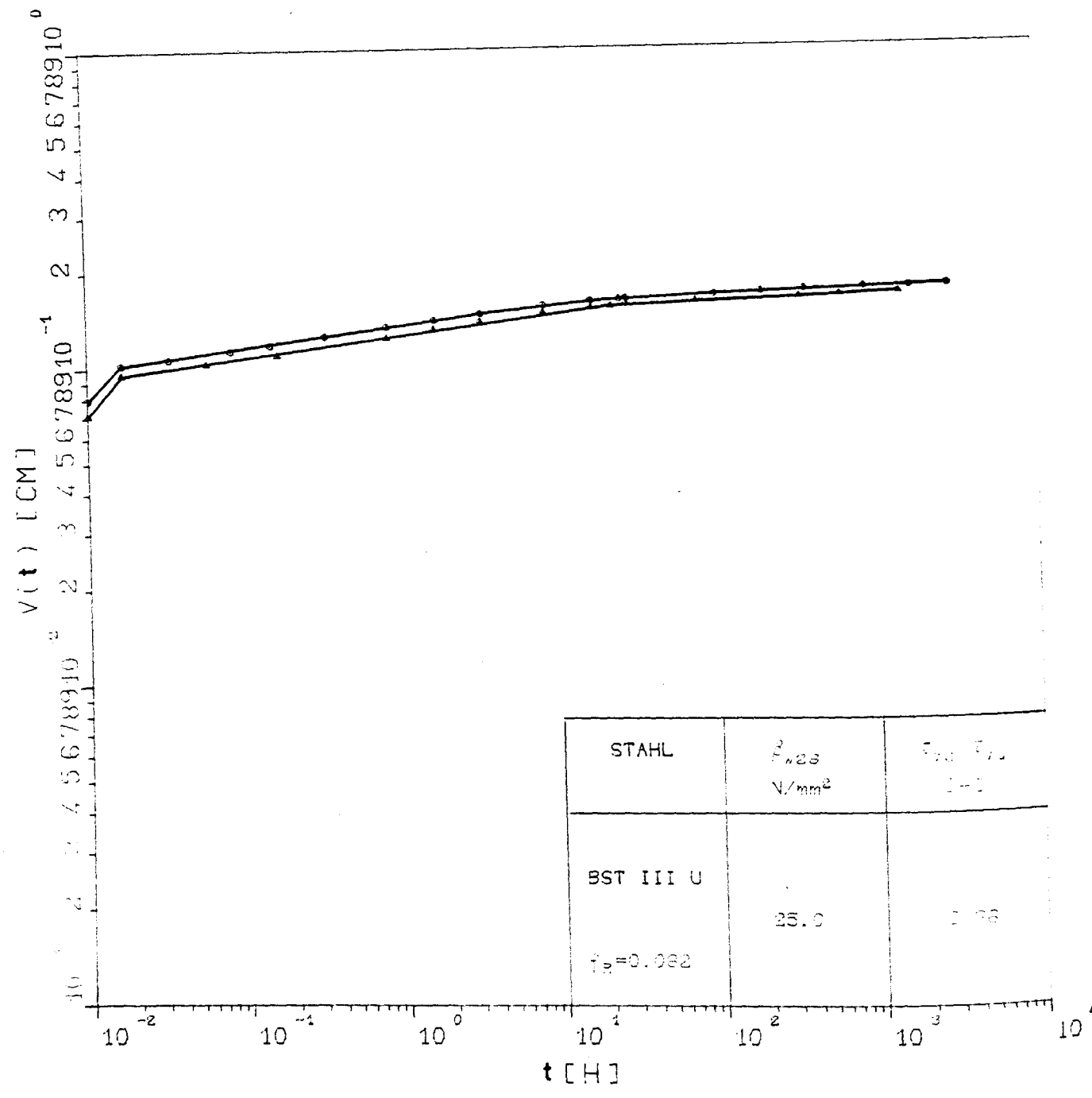
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ8.16 und AKZ8.19, Belastungs-
alter $t_0=145d$



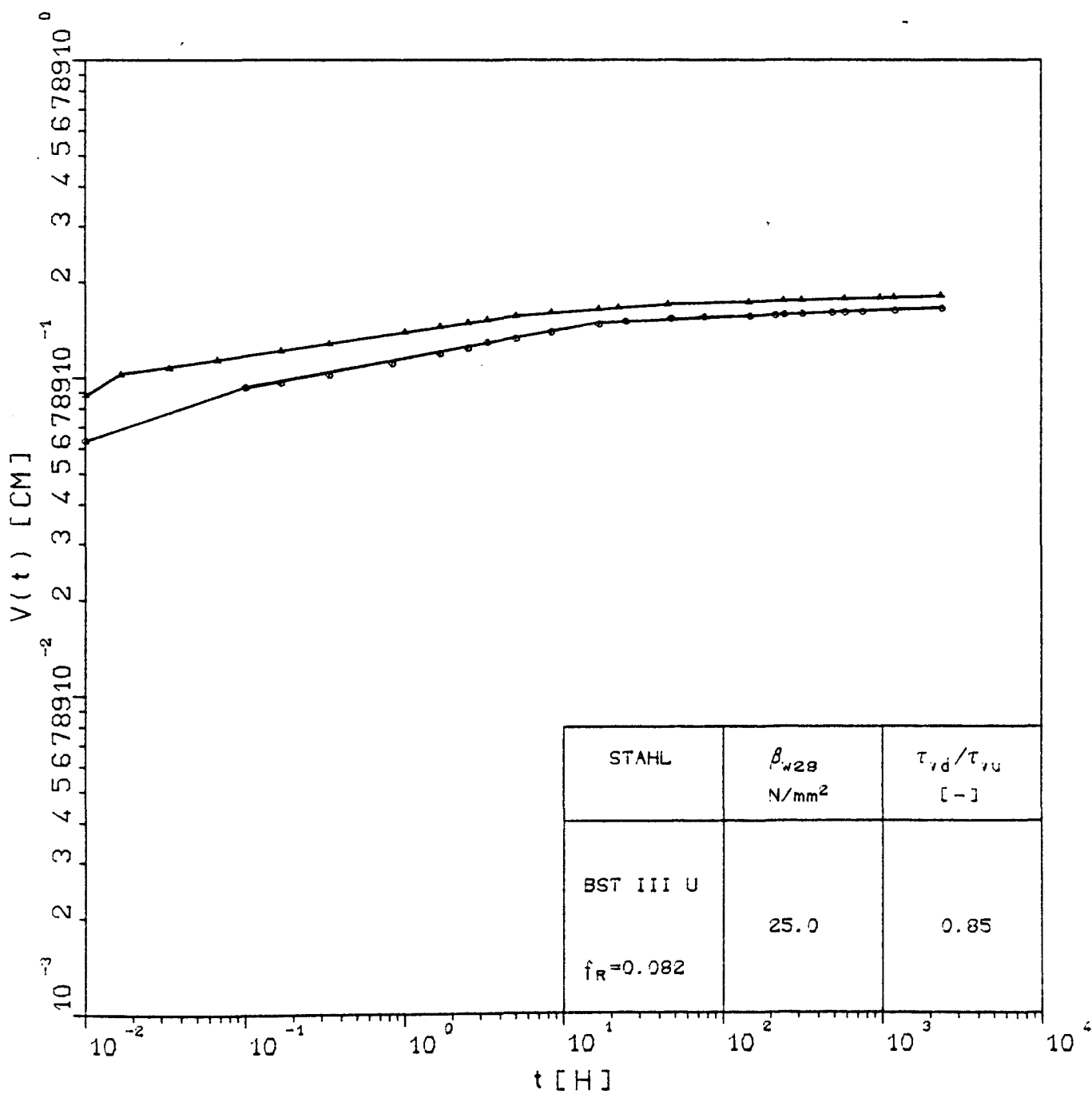
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ8.12, AKZ8.14 und AKZ8.18,
Belastungsalter $t_0=421d$



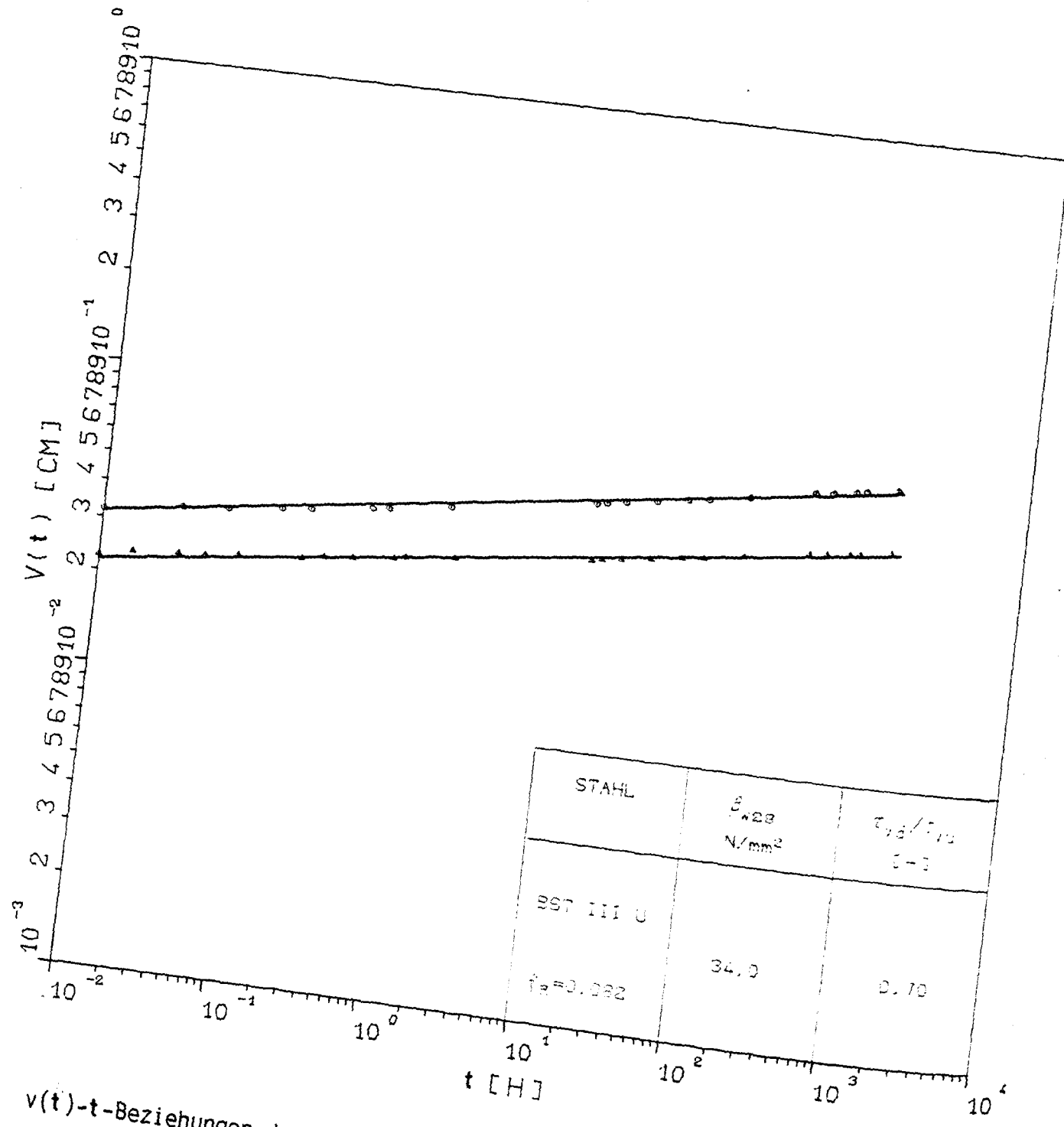
v(t)-t-Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ9.05 und AKZ9.06, Belastungs-
alter $t_0=14d$



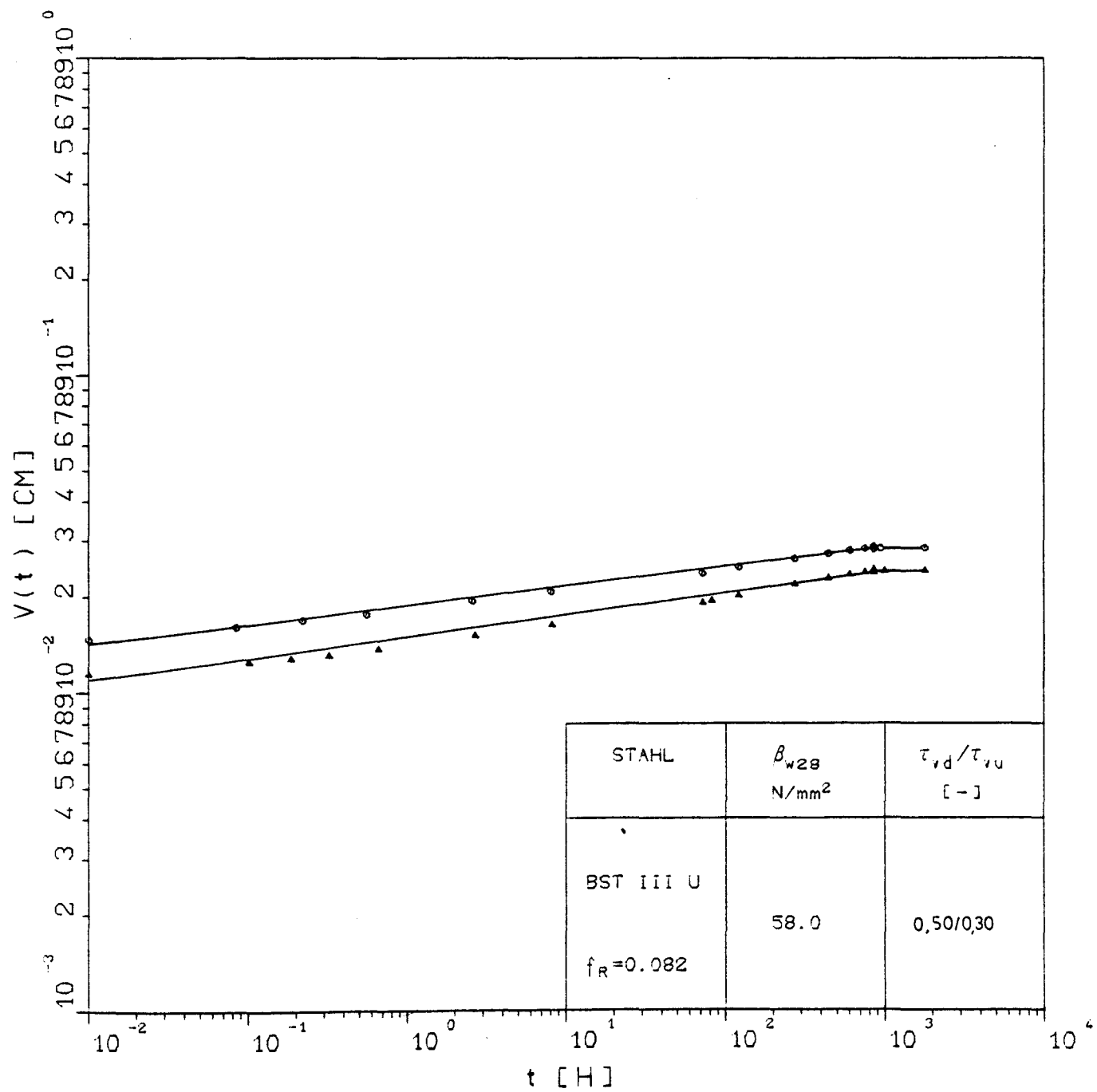
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ9.13 und AKZ9.19, Belastungs-
alter $t_0=117d$



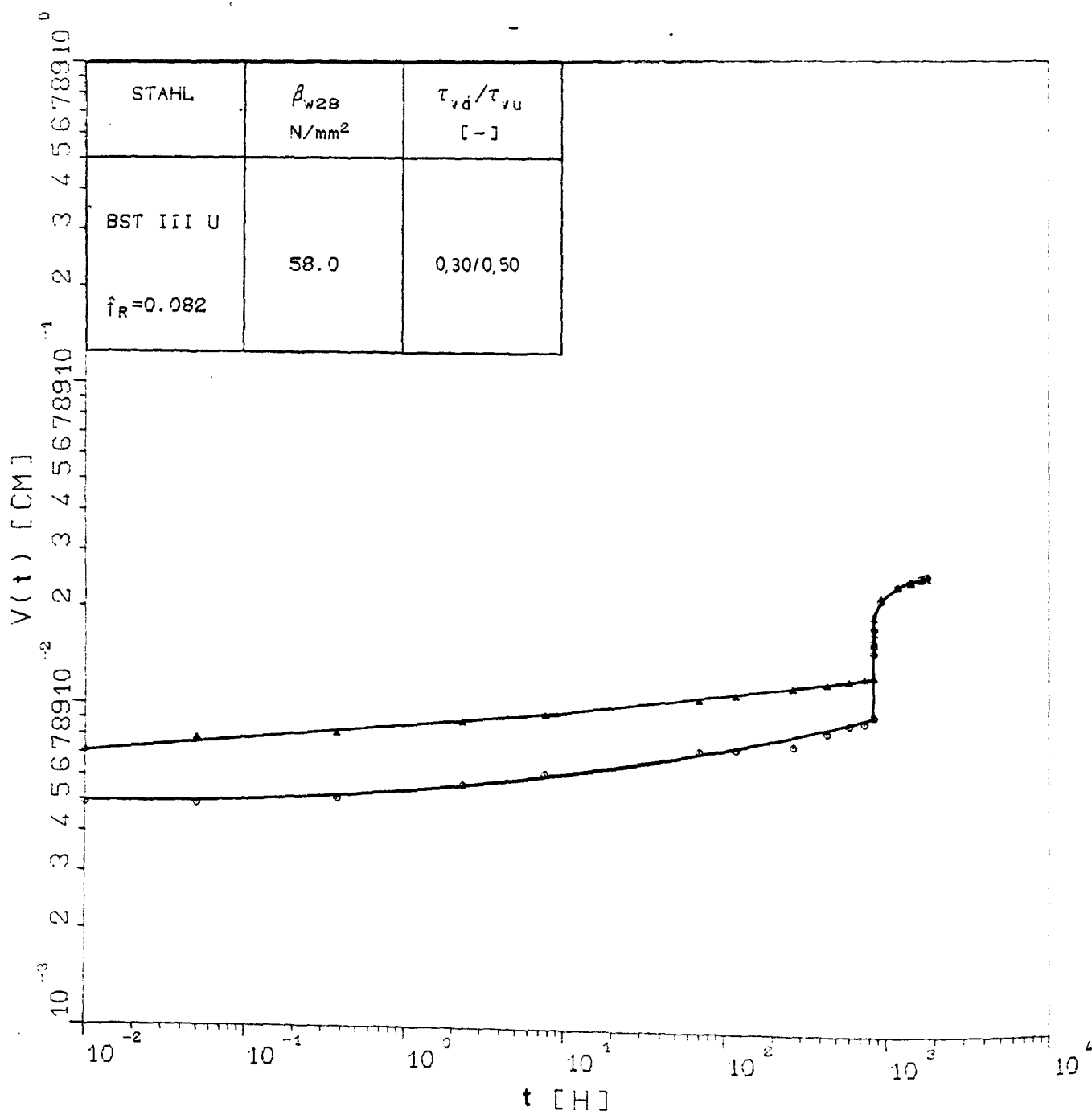
v(t)-t-Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ9.07 und AKZ9.11, Belastungs-
alter $t_0=117d$



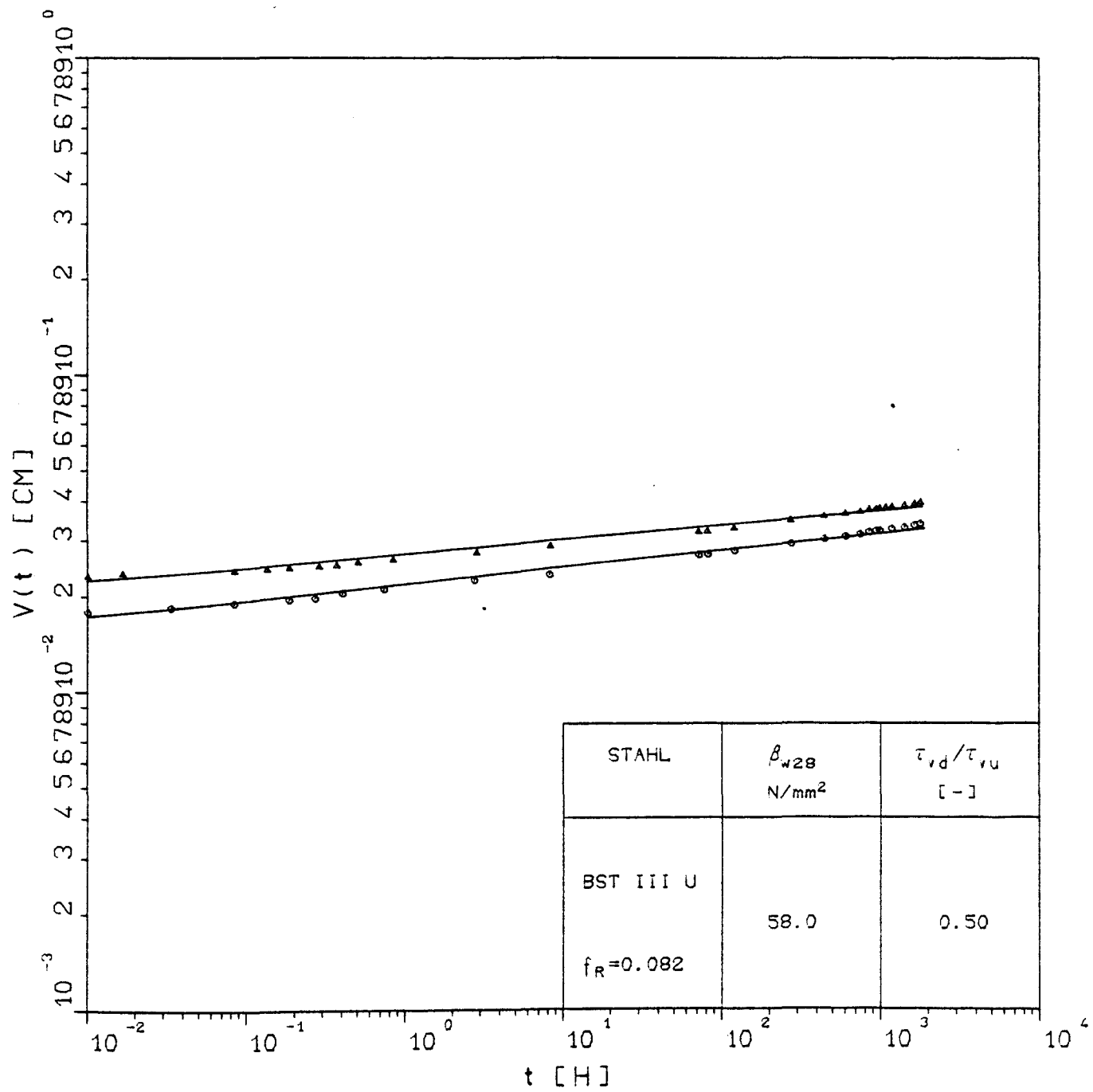
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ10.02 und AKZ10.16



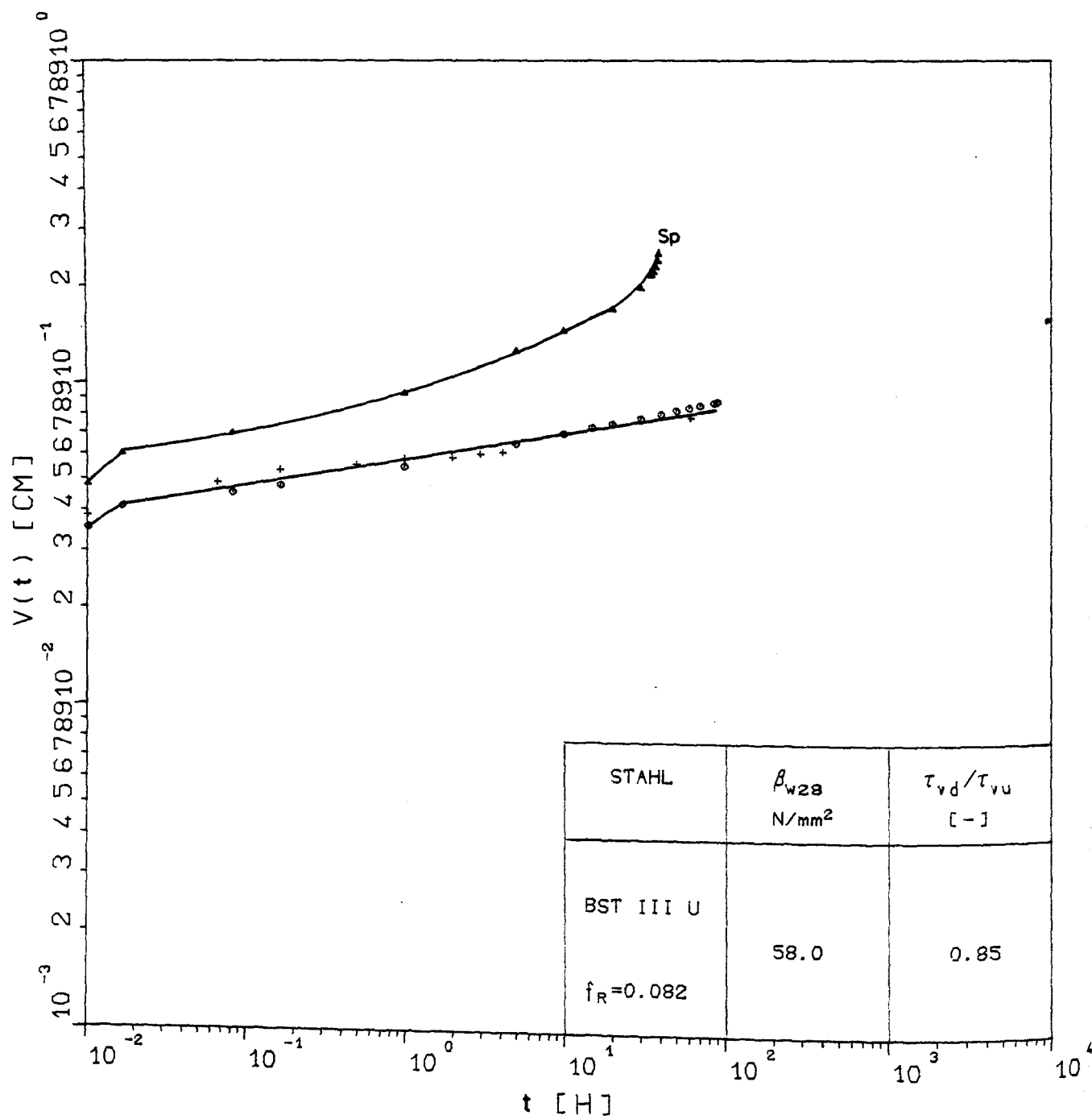
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ11.13 und AKZ11.18



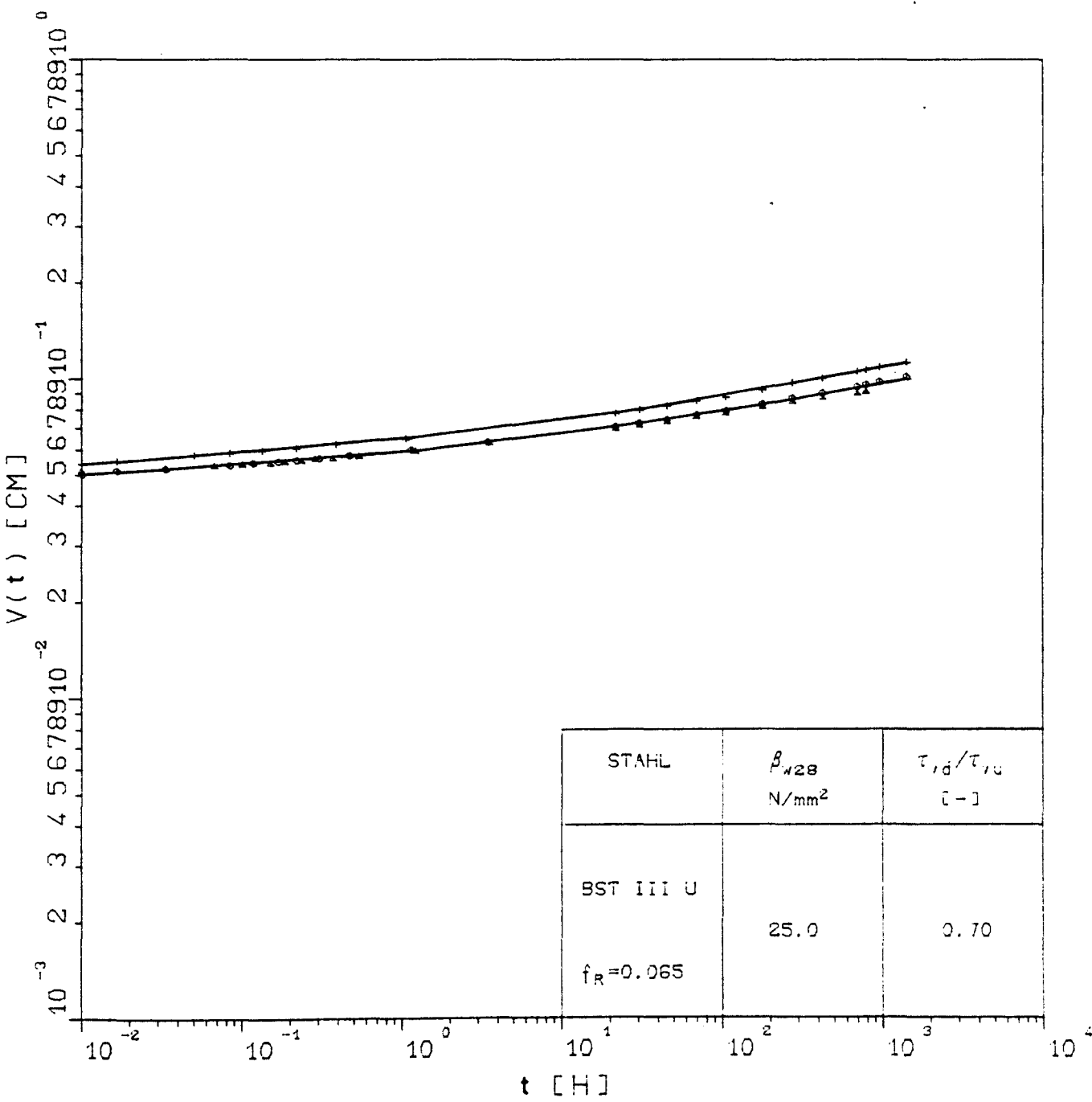
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ11.11 und AKZ11.12



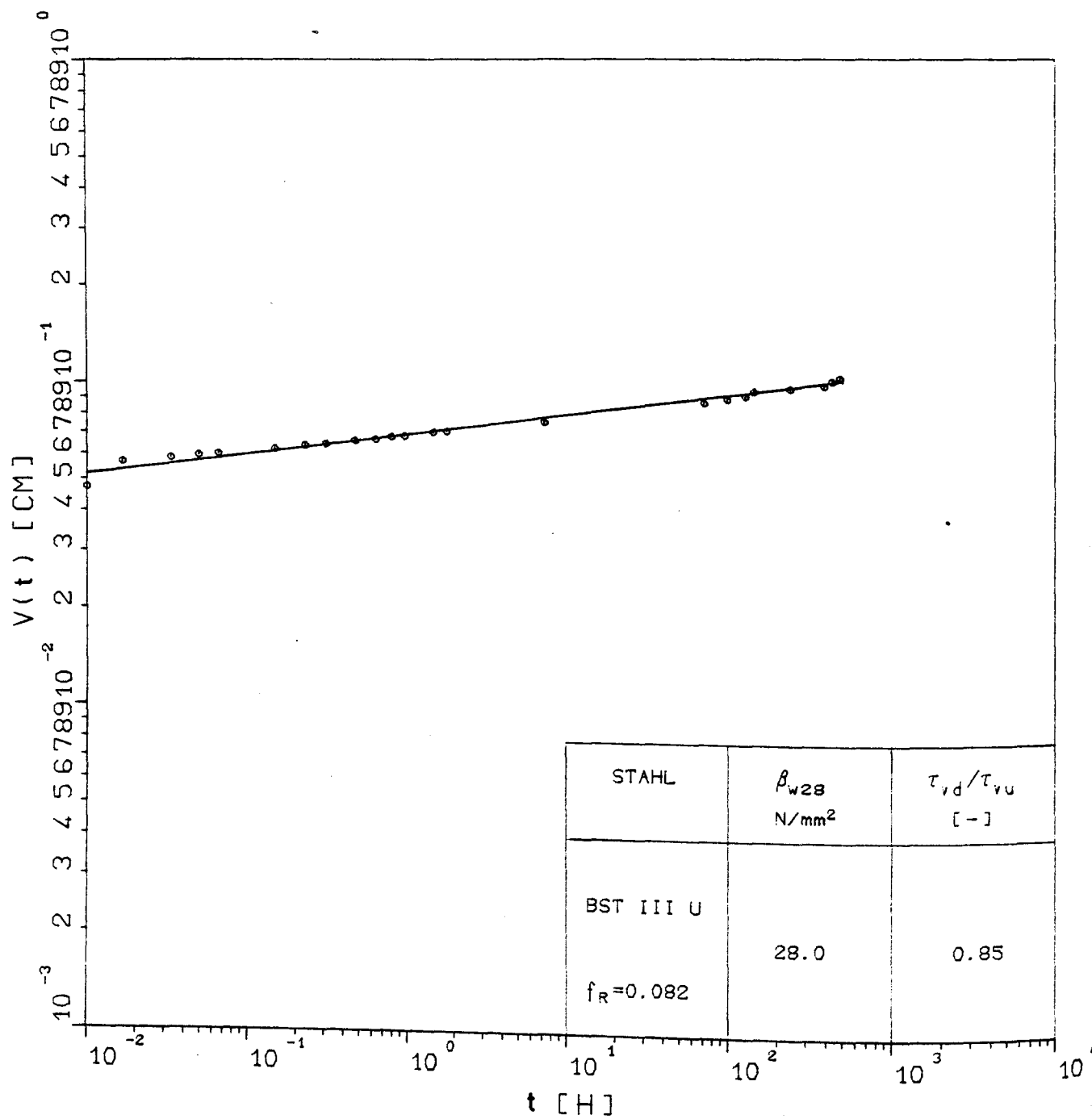
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ11.19 und AKZ11.20



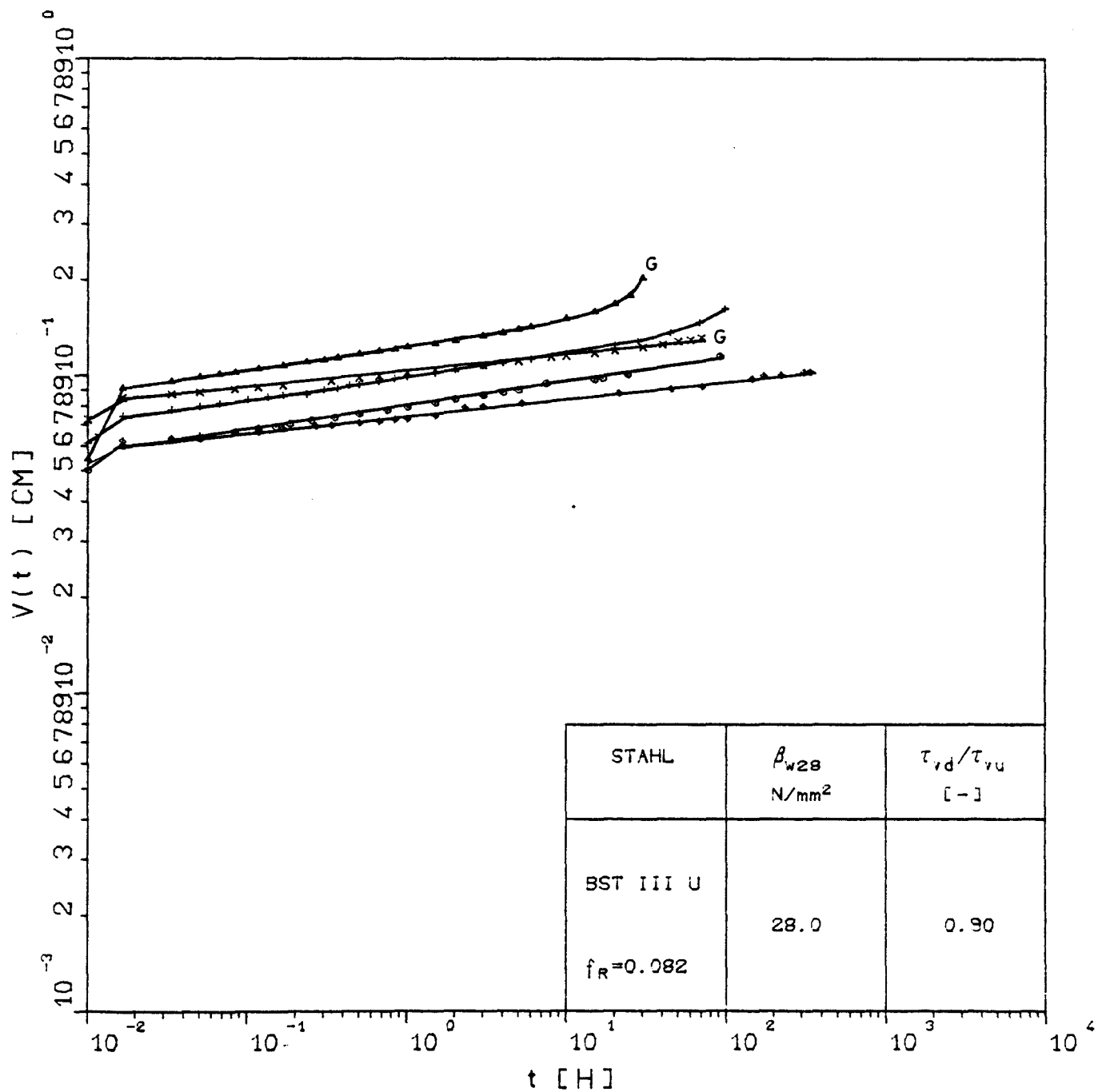
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ11.04, AKZ11.05 und AKZ11.07



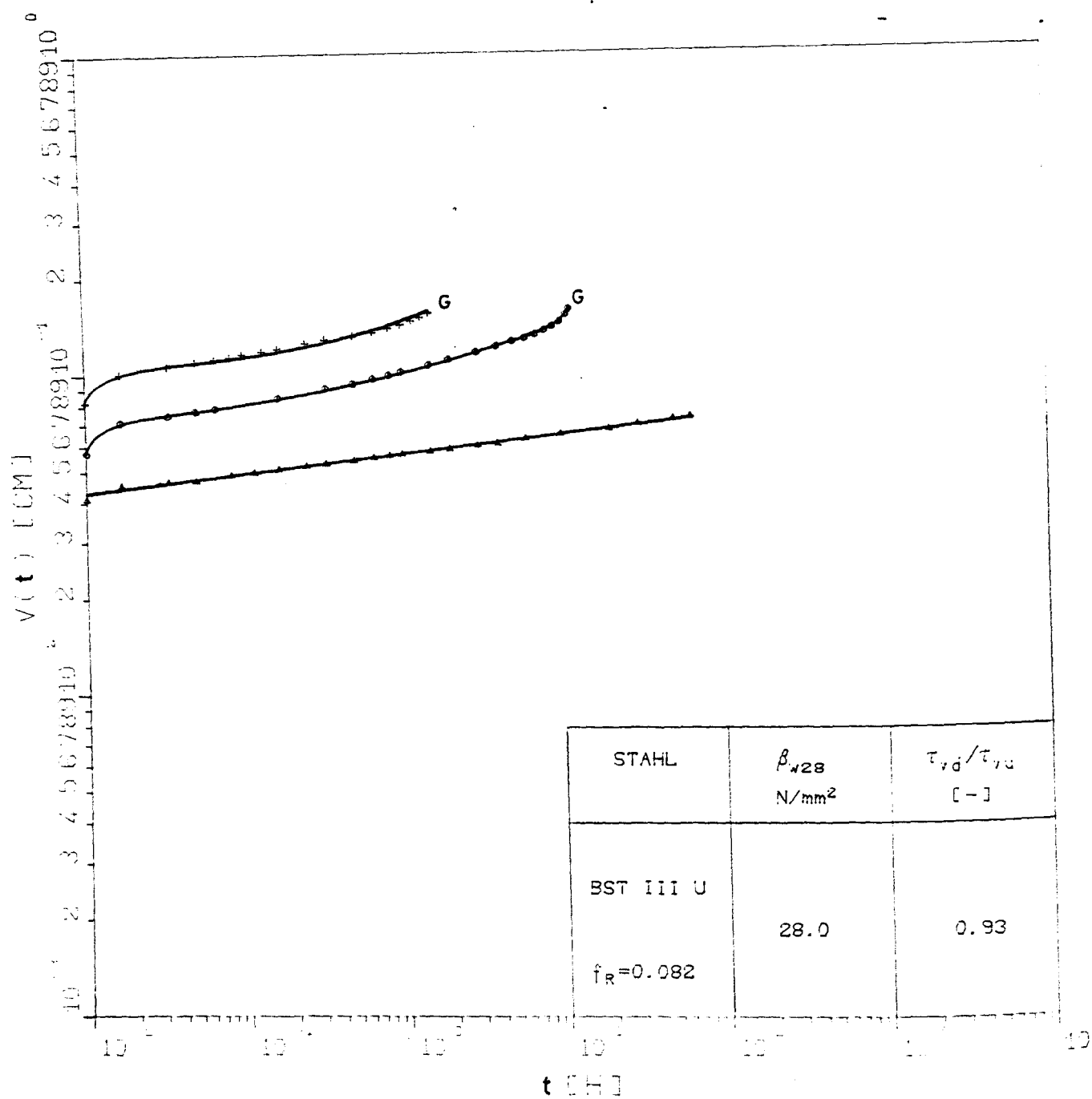
v(t)-t-Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ12.08, AKZ12.12 und AKZ12.13



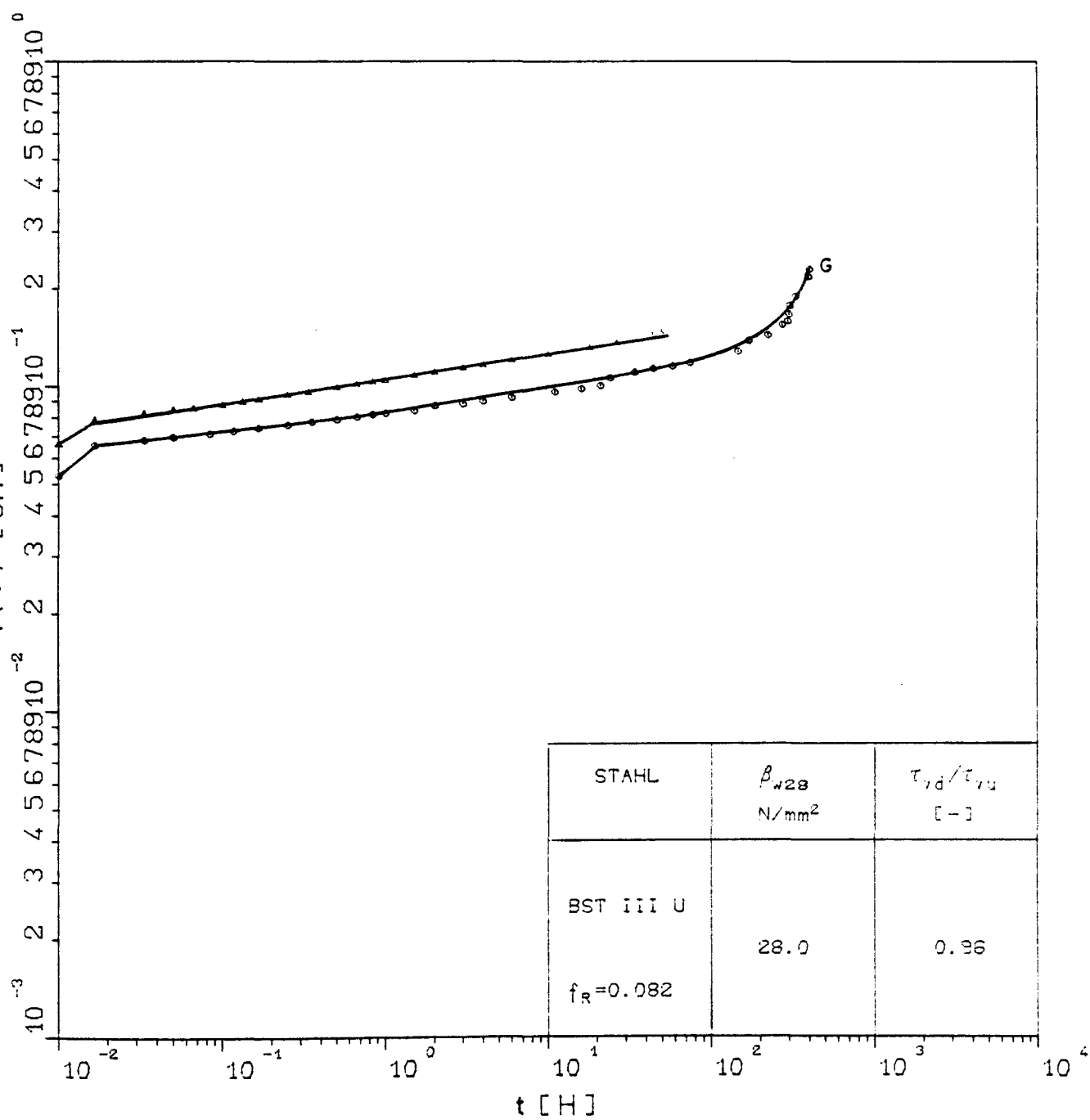
$v(t)$ - t -Beziehung des Dauerstandversuchs AKZ13.14



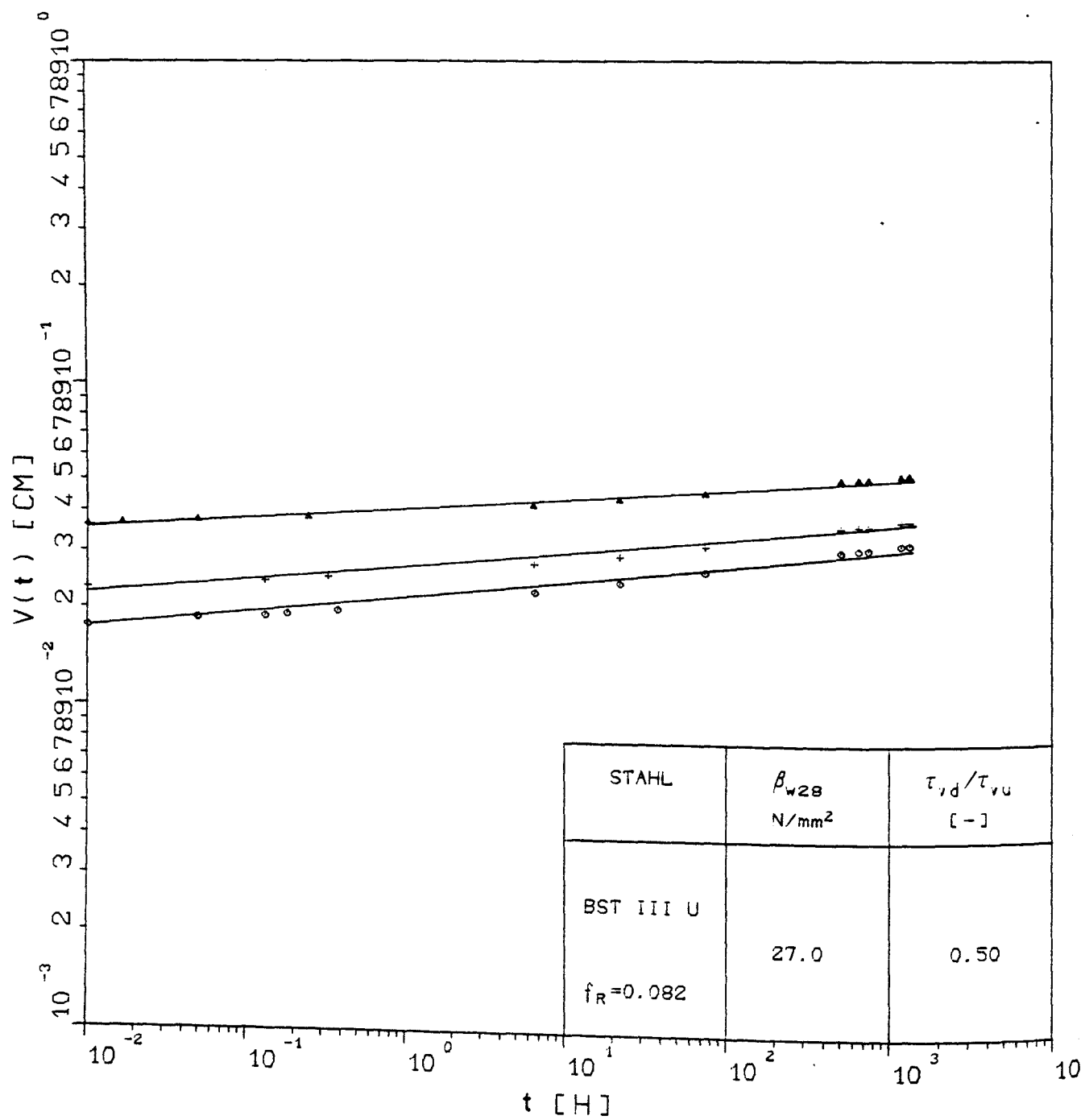
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ13.03, AKZ13.04, AKZ13.11, AKZ13.17 und AKZ13.18



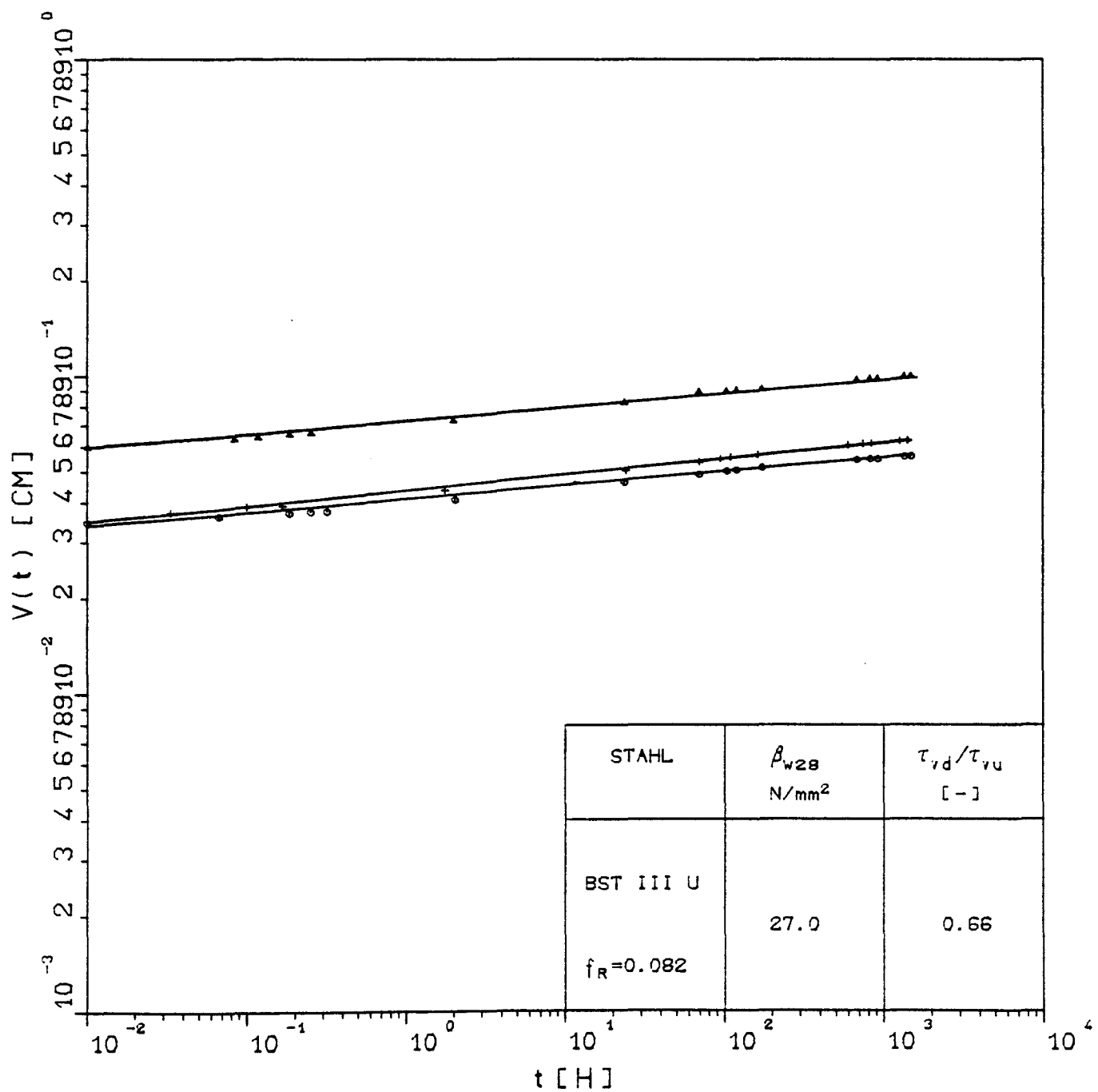
$v(t)$ - t -Beziehung der Dauerstandversuche AKZ13.06, AKZ13.09 und AKZ13.20



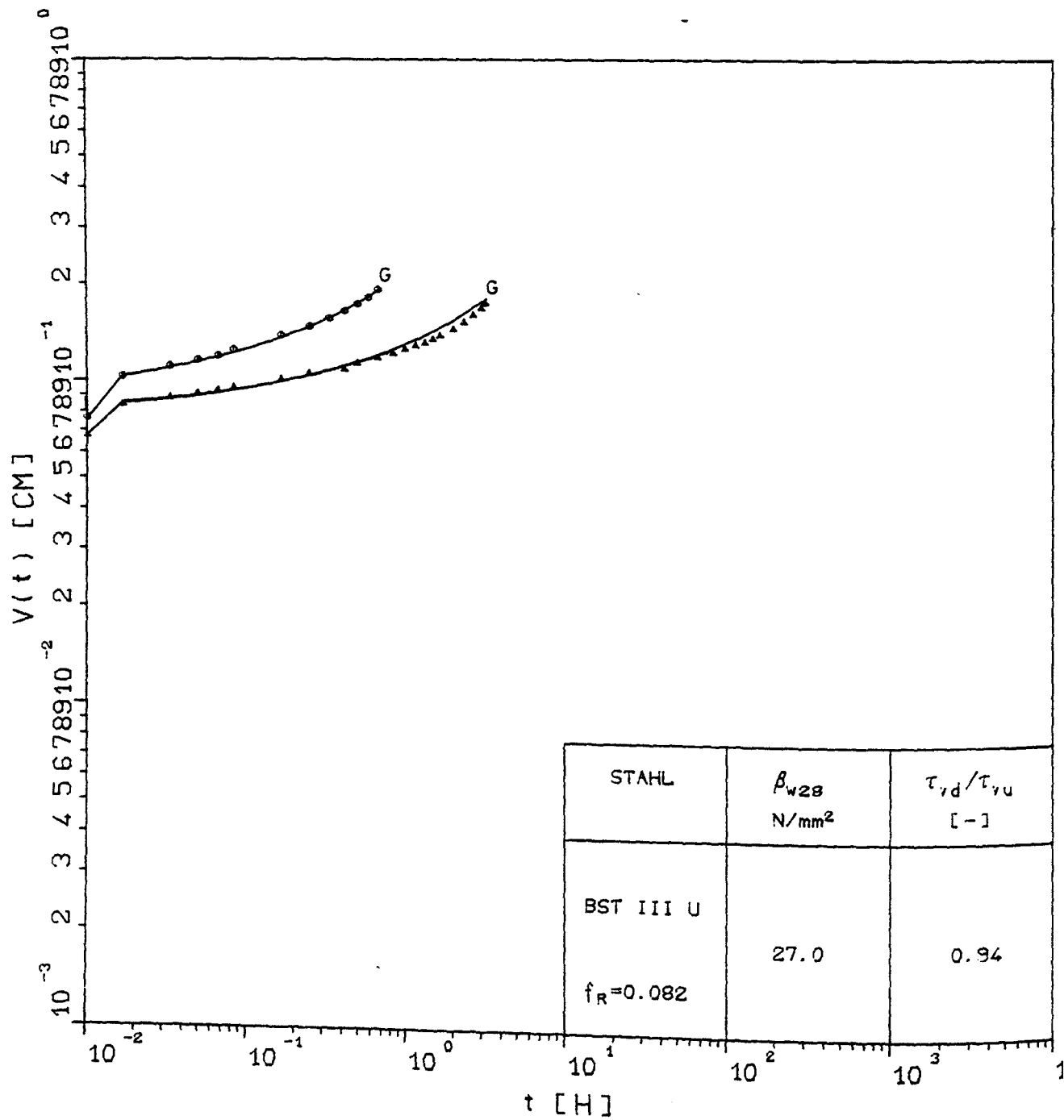
v(t)-t-Beziehung der Dauerstandversuche AKZ13.01 und AKZ13.13



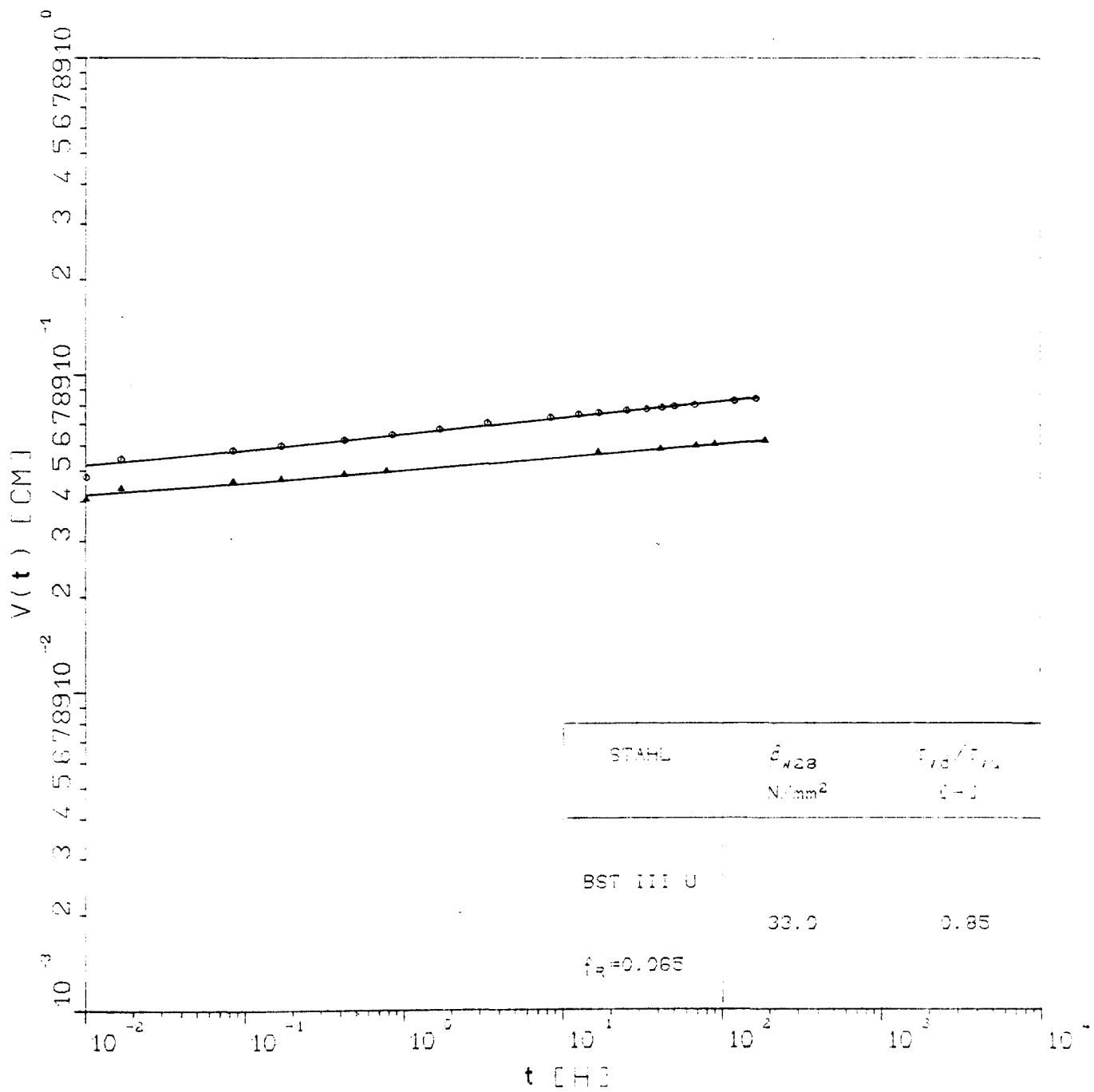
$v(t)$ - t -Beziehung der Dauerstandversuche AKZ15.15, AKZ15.16 und AKZ15.19



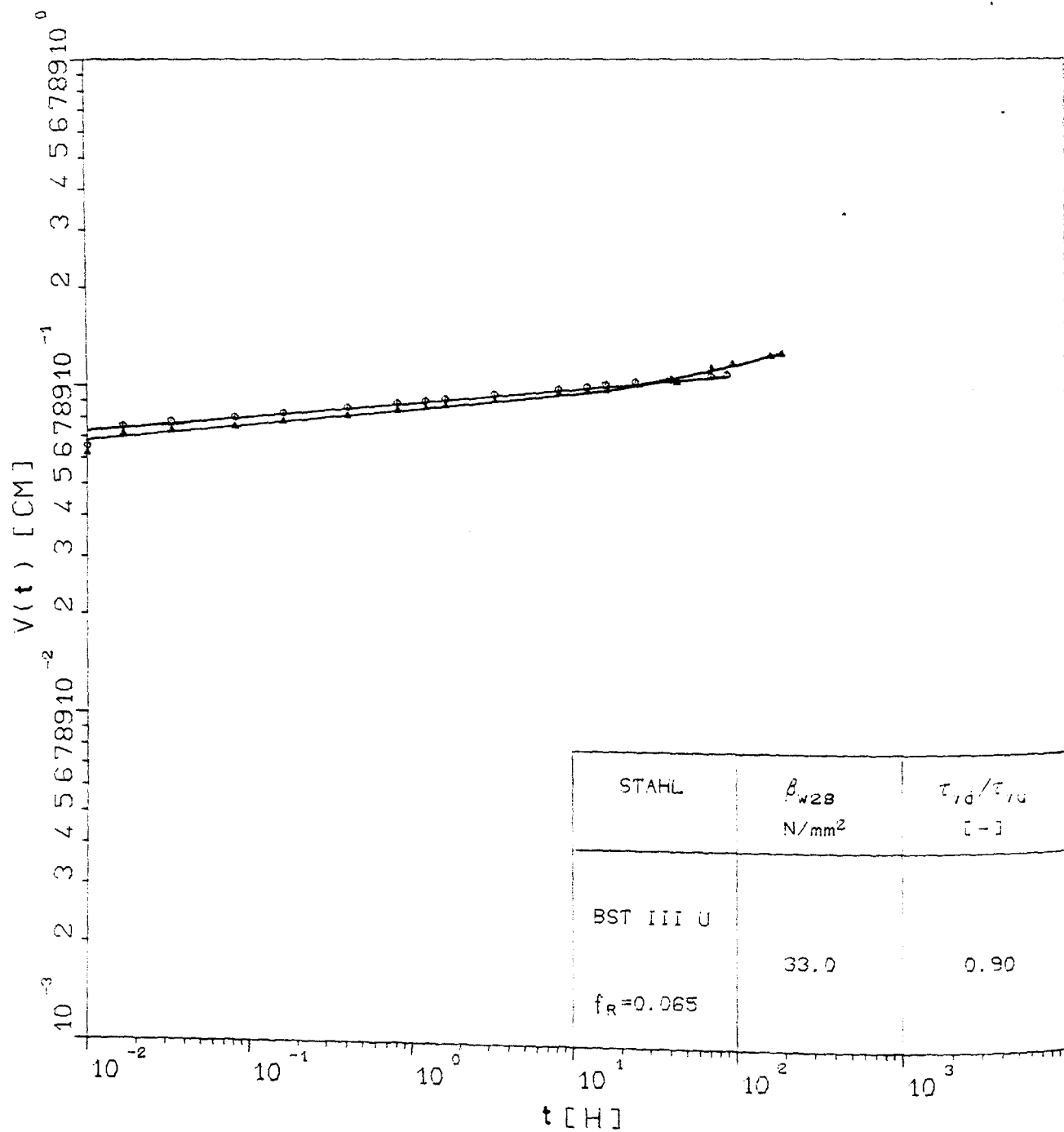
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ15.04, AKZ15.07 und AKZ15.08



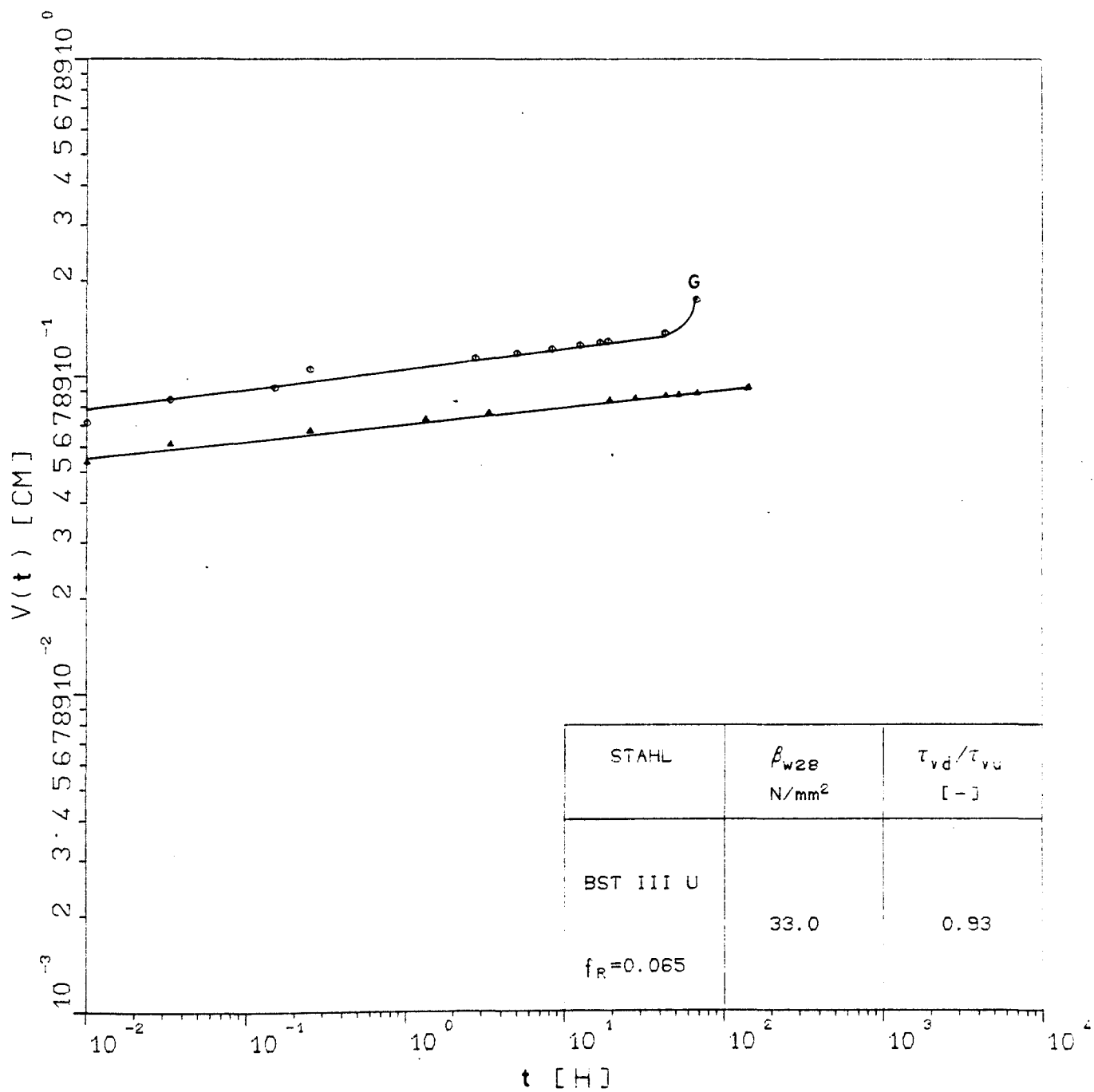
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ15.02 und AKZ15.05



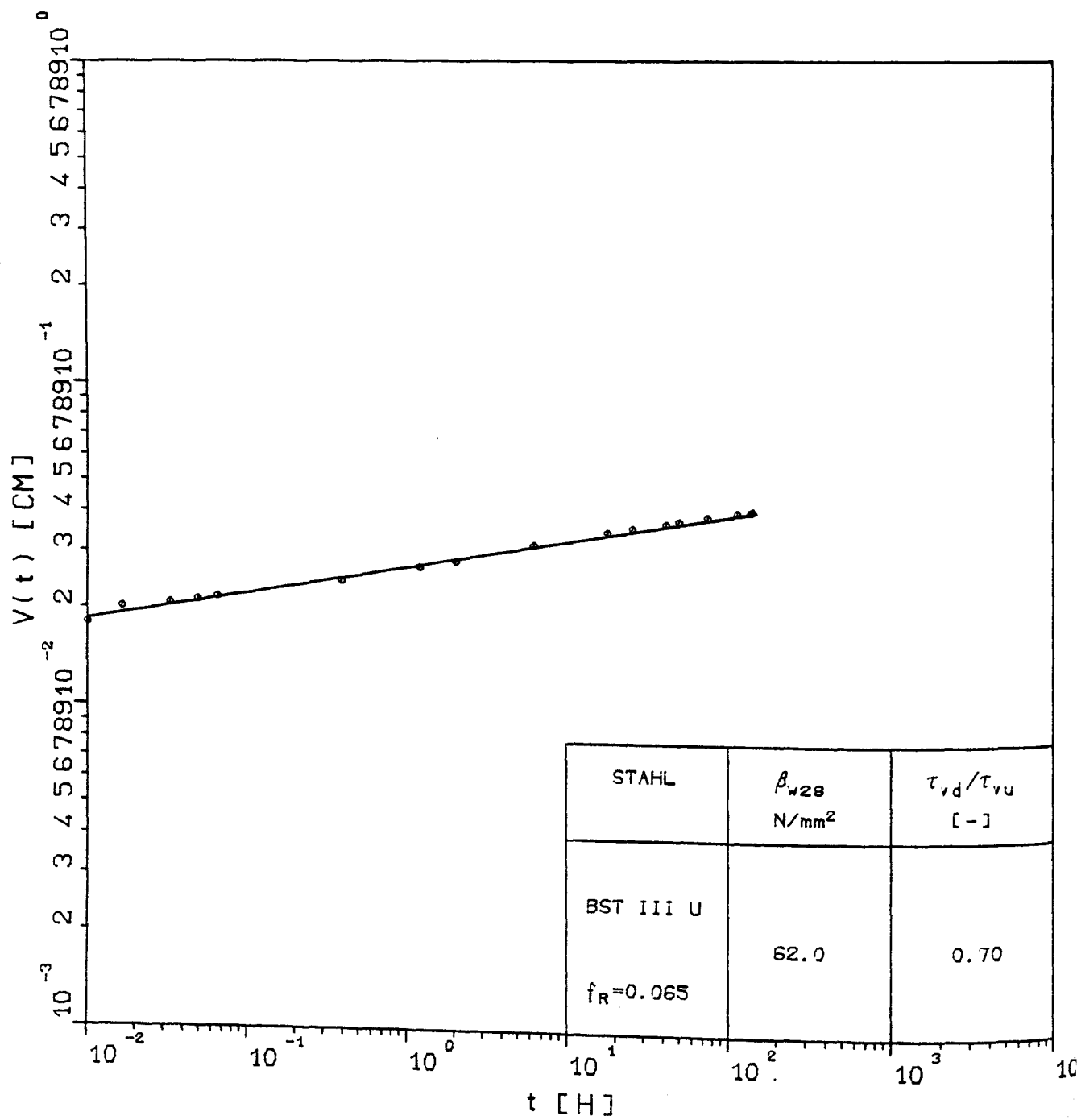
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ18.02 und AKZ18.17



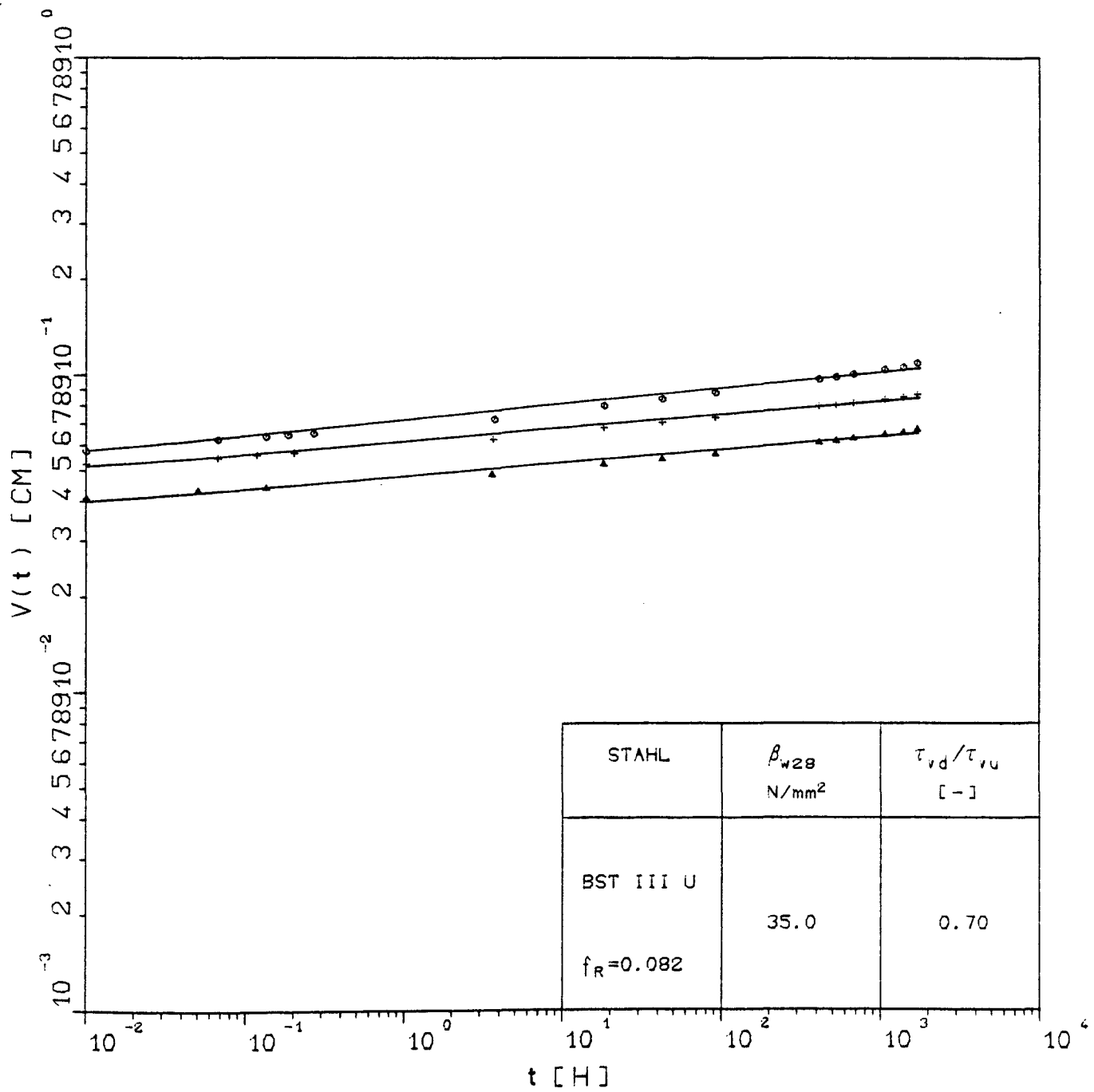
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ18.06 und AKZ18.15



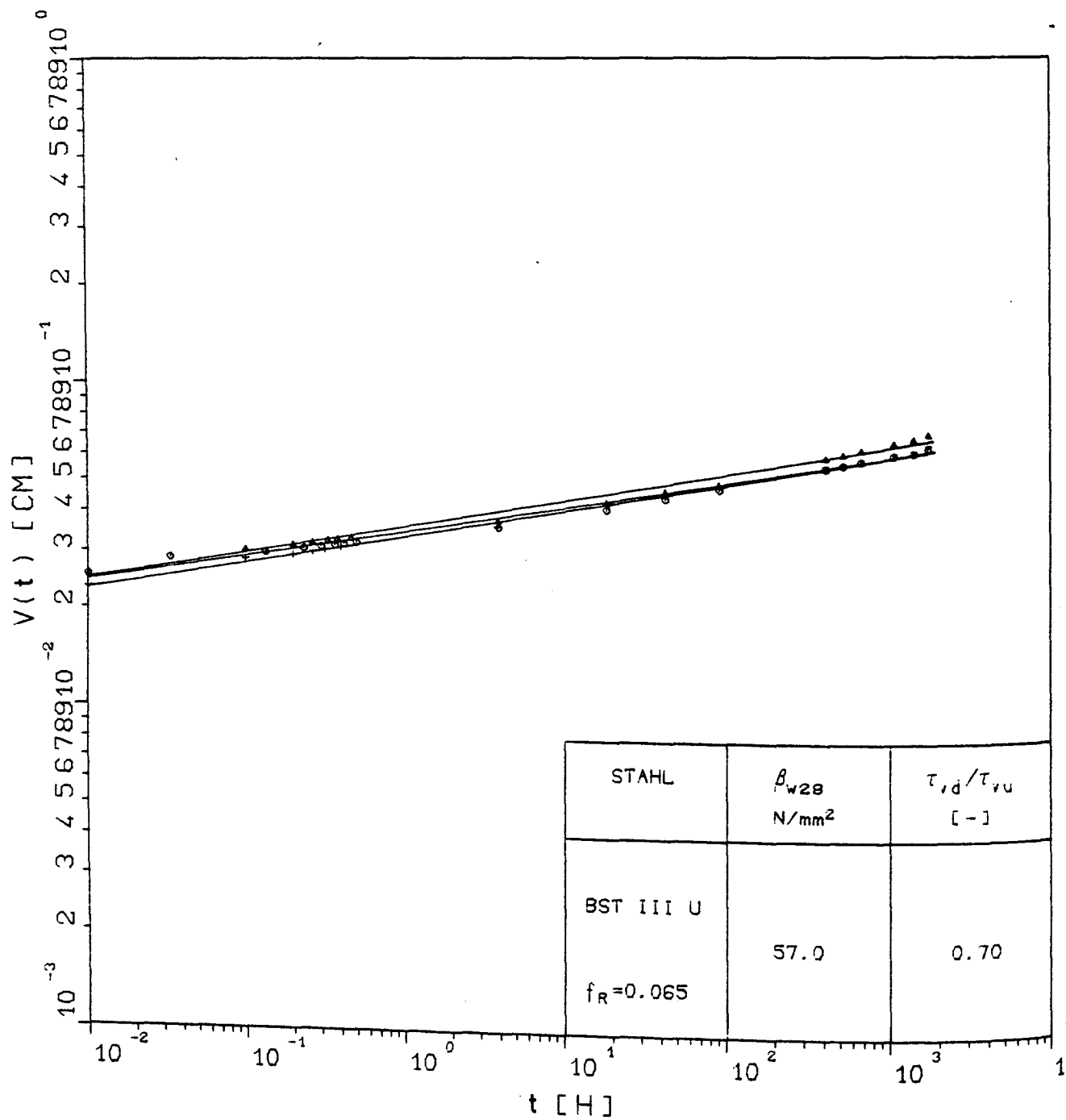
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ18.04 und AKZ18.18



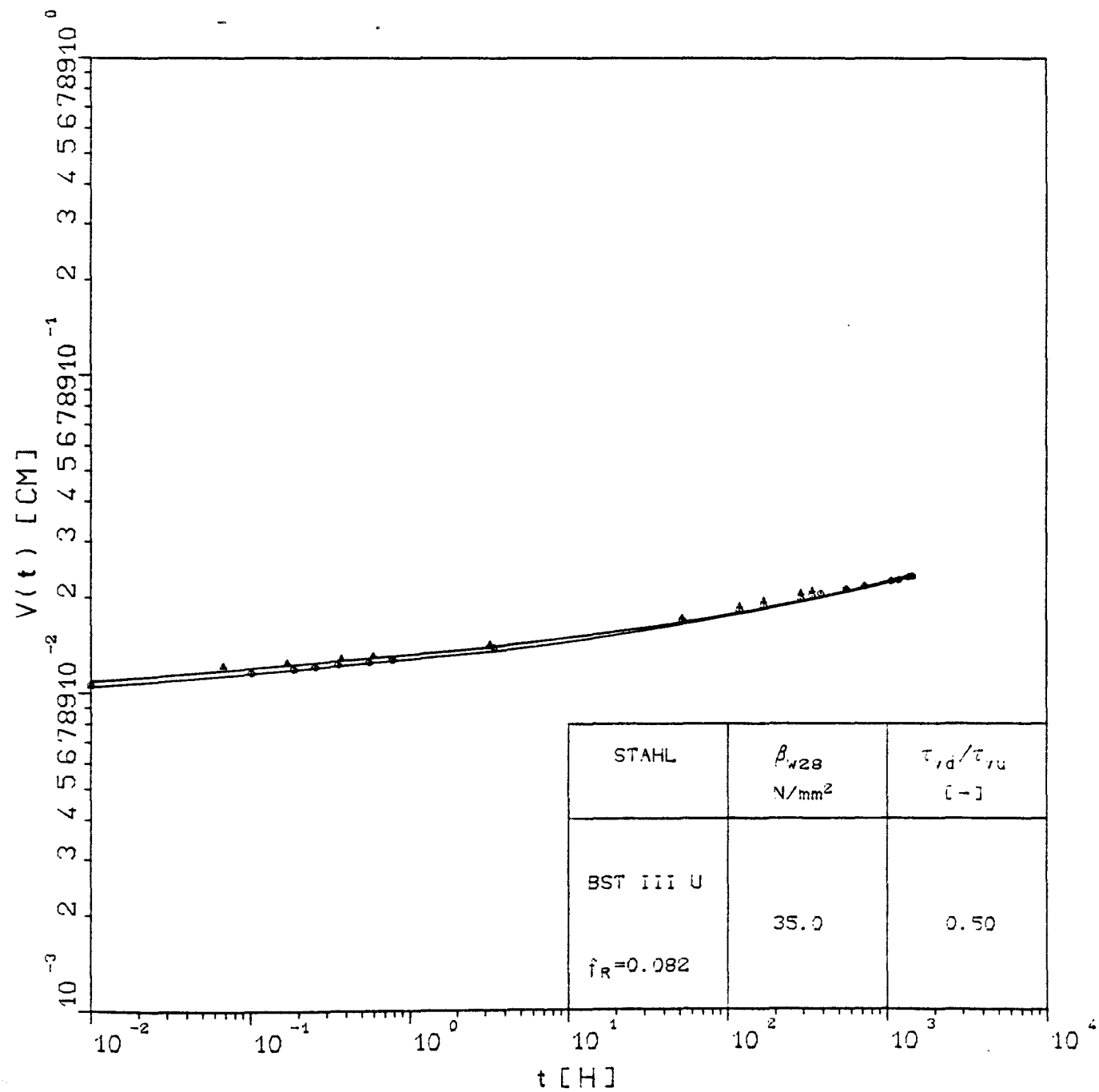
$v(t)$ - t -Beziehung des Dauerstandversuches AKZ19.09



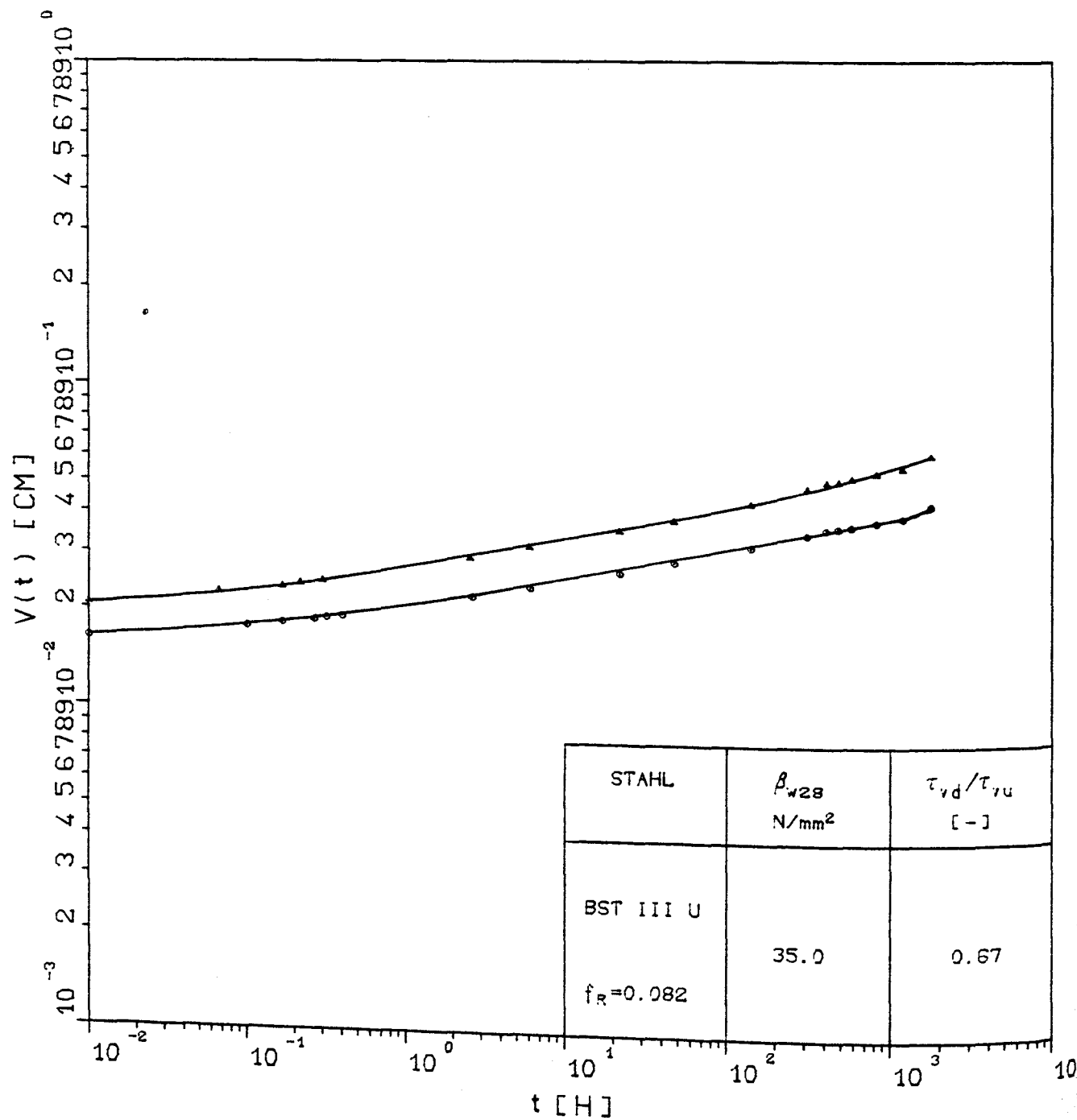
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ20.01, AKZ20.03 und AKZ20.20



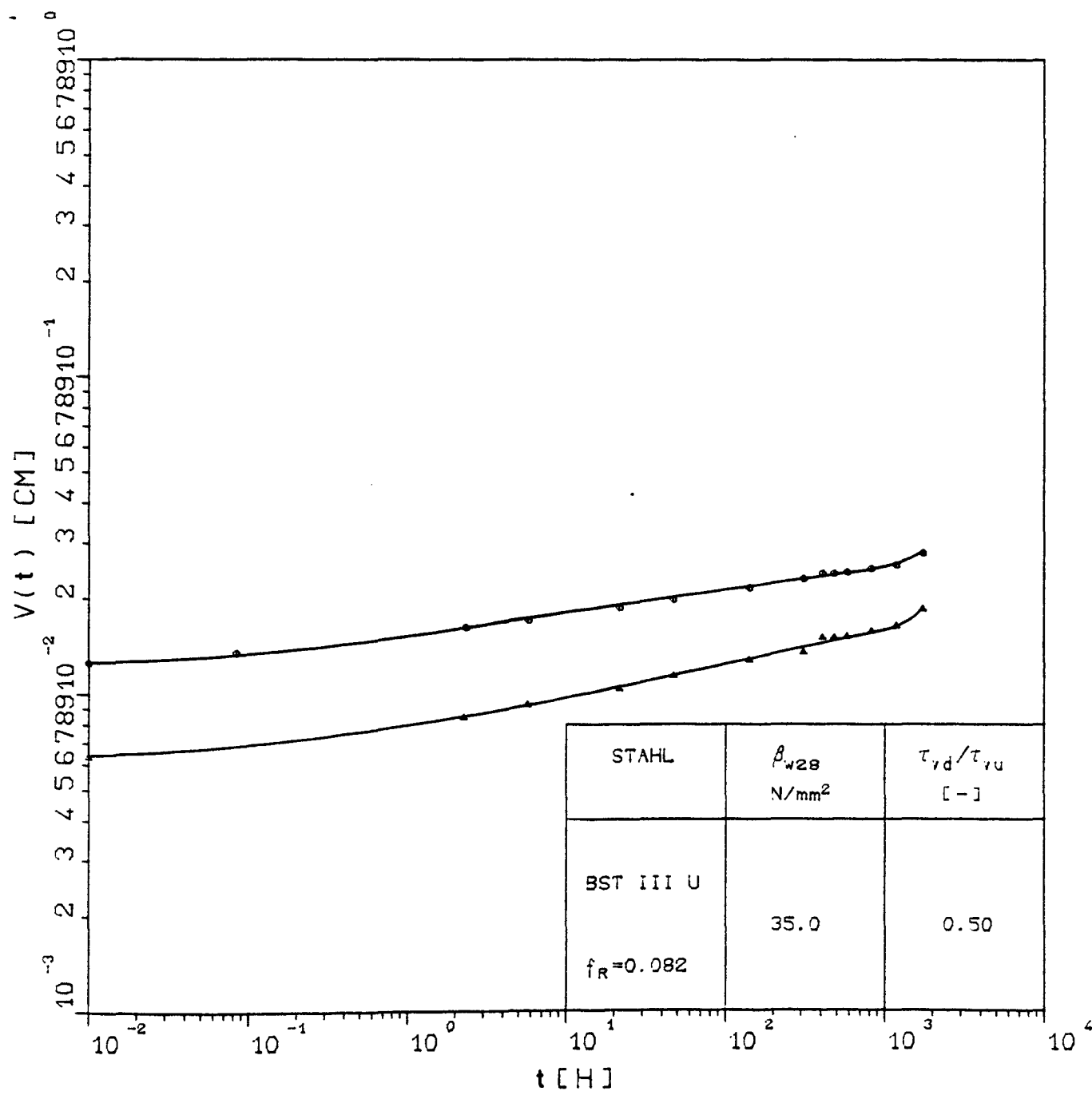
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKZ21.09, AKZ21.13 und AKZ21.14



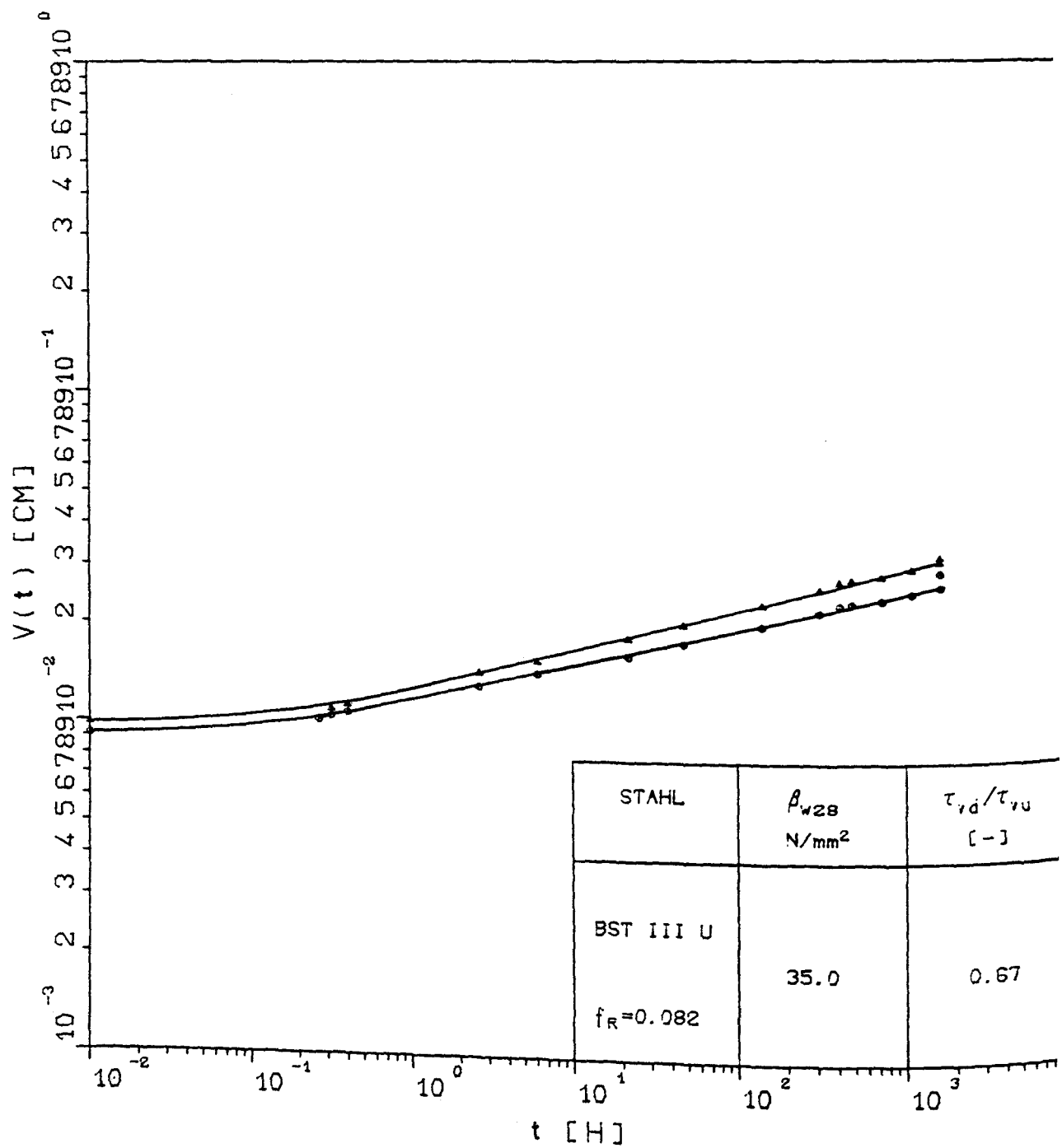
v(t)-t-Beziehungen der Dauerstandversuche AKE1.2 und AKE1.5, zentrisch



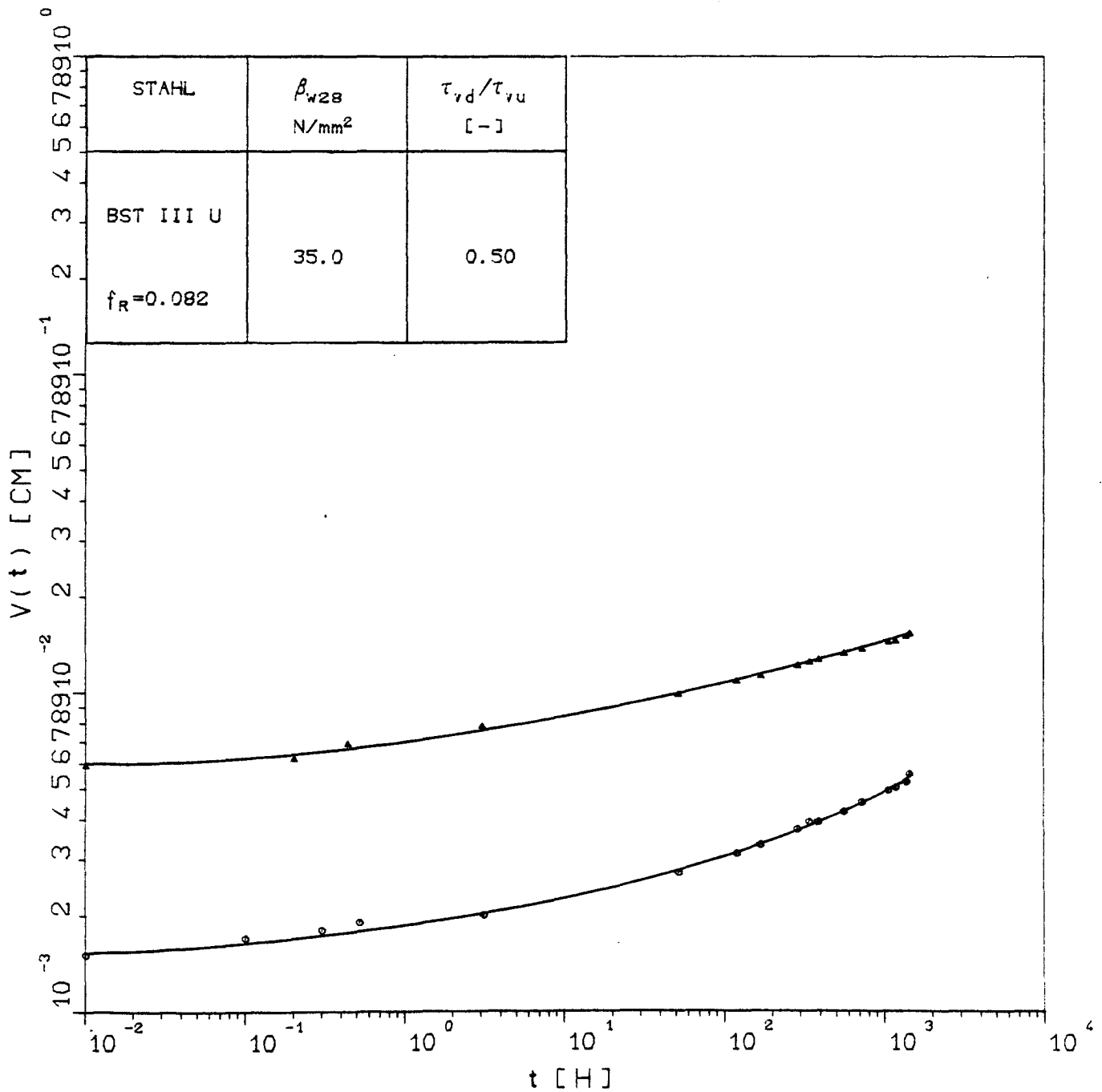
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKE1.1 und AKE1.6, zentrisch



v(t)-t-Beziehungen der Dauerstandversuche AKE1.07 und AKE1.06, Randlage 2 ds

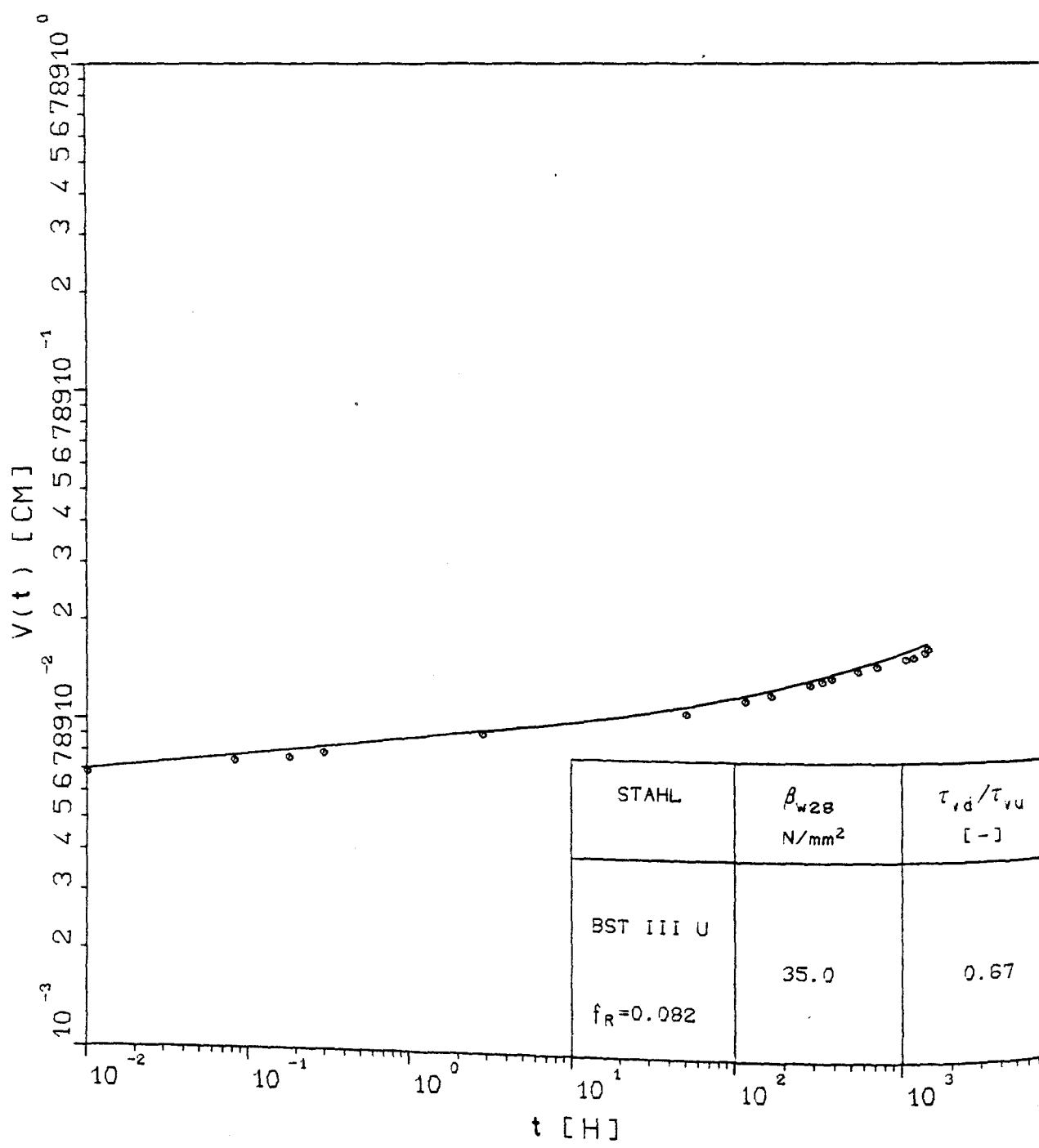


Handgezeichnet
v(t)-t-Beziehungen der Dauerstandversuche AKE1.04 und AKE1.05, Randlage

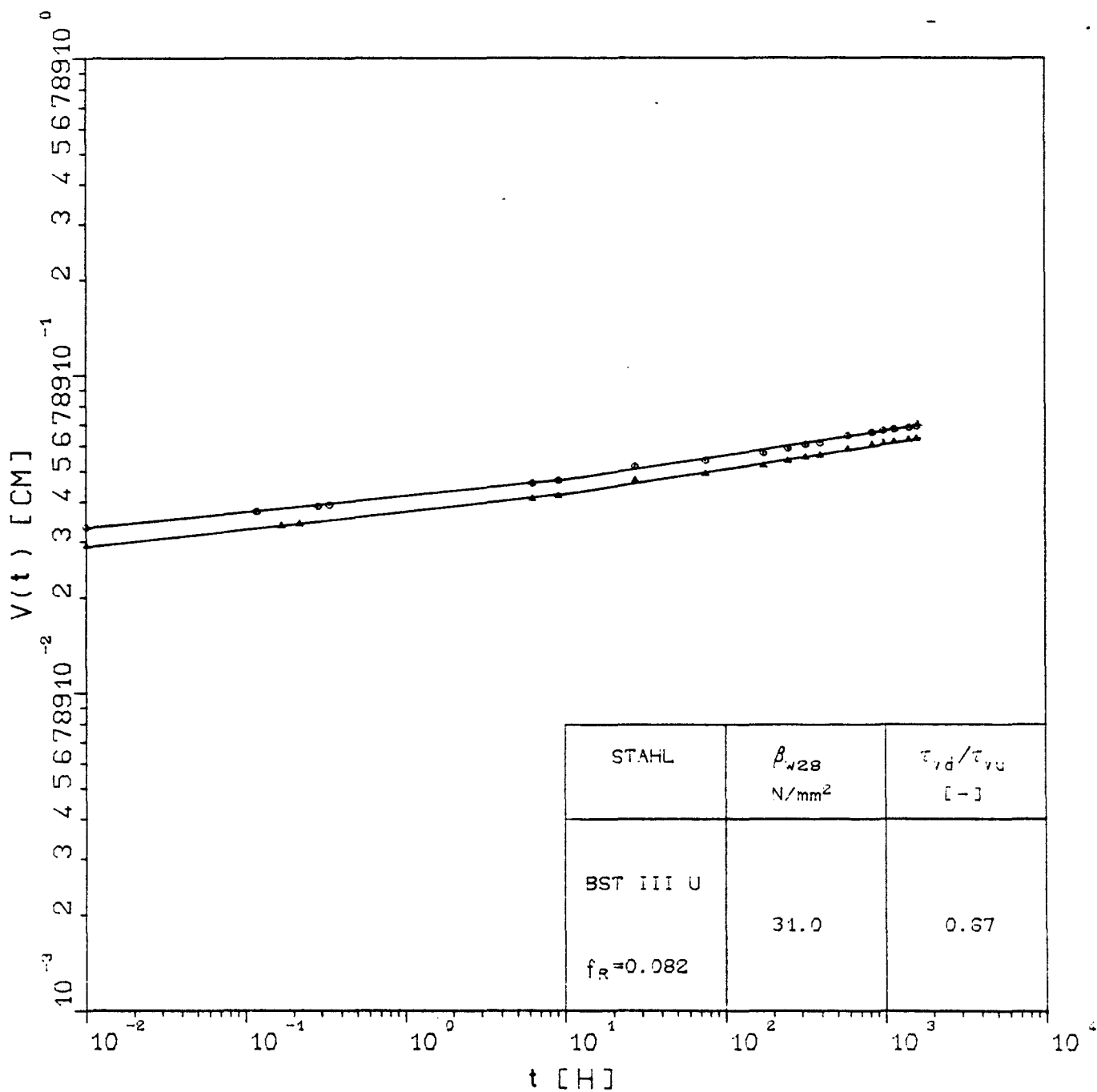


Formellose Lösung

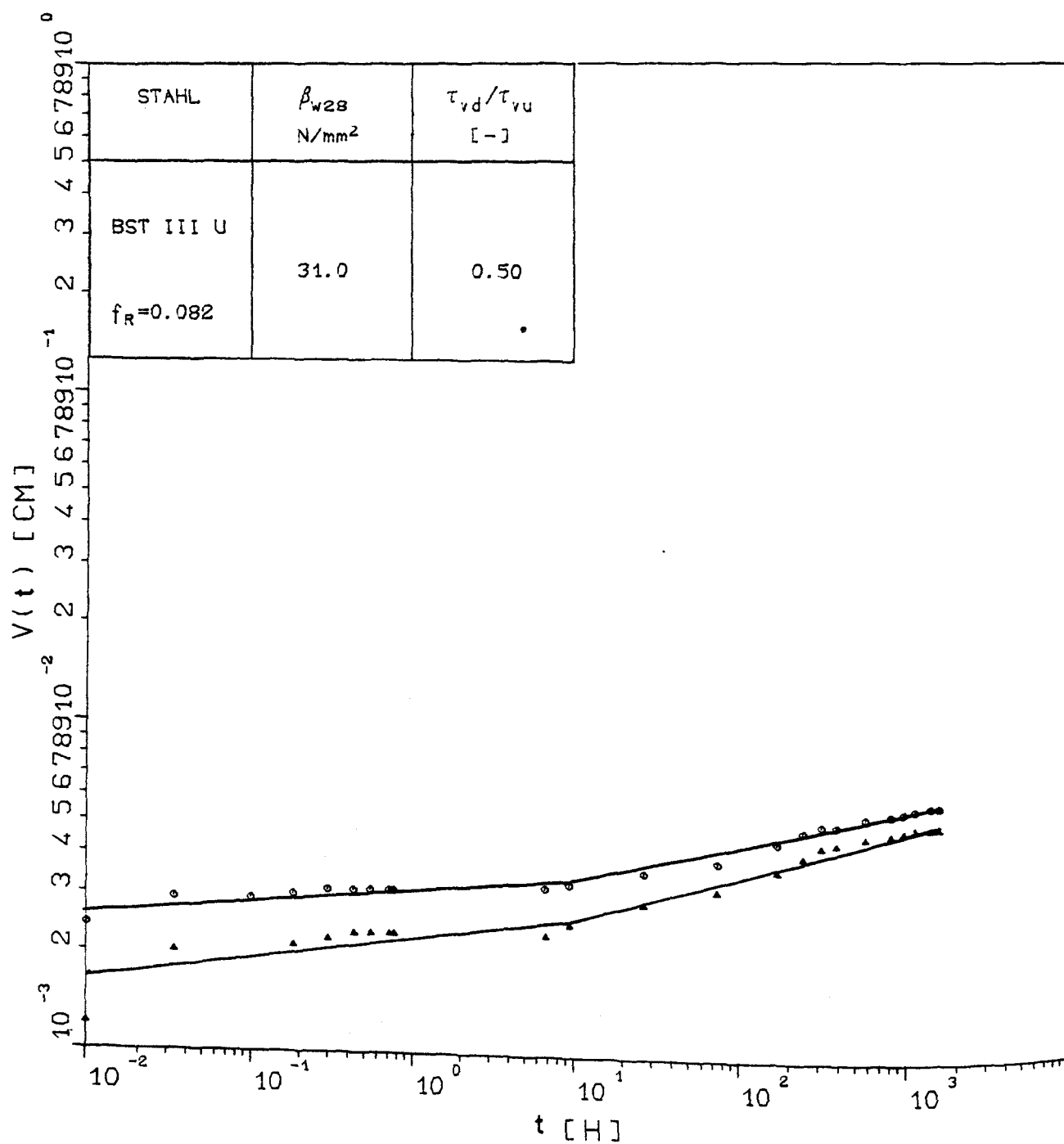
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKE1.02 und AKE1.04, Randlage 1 ds



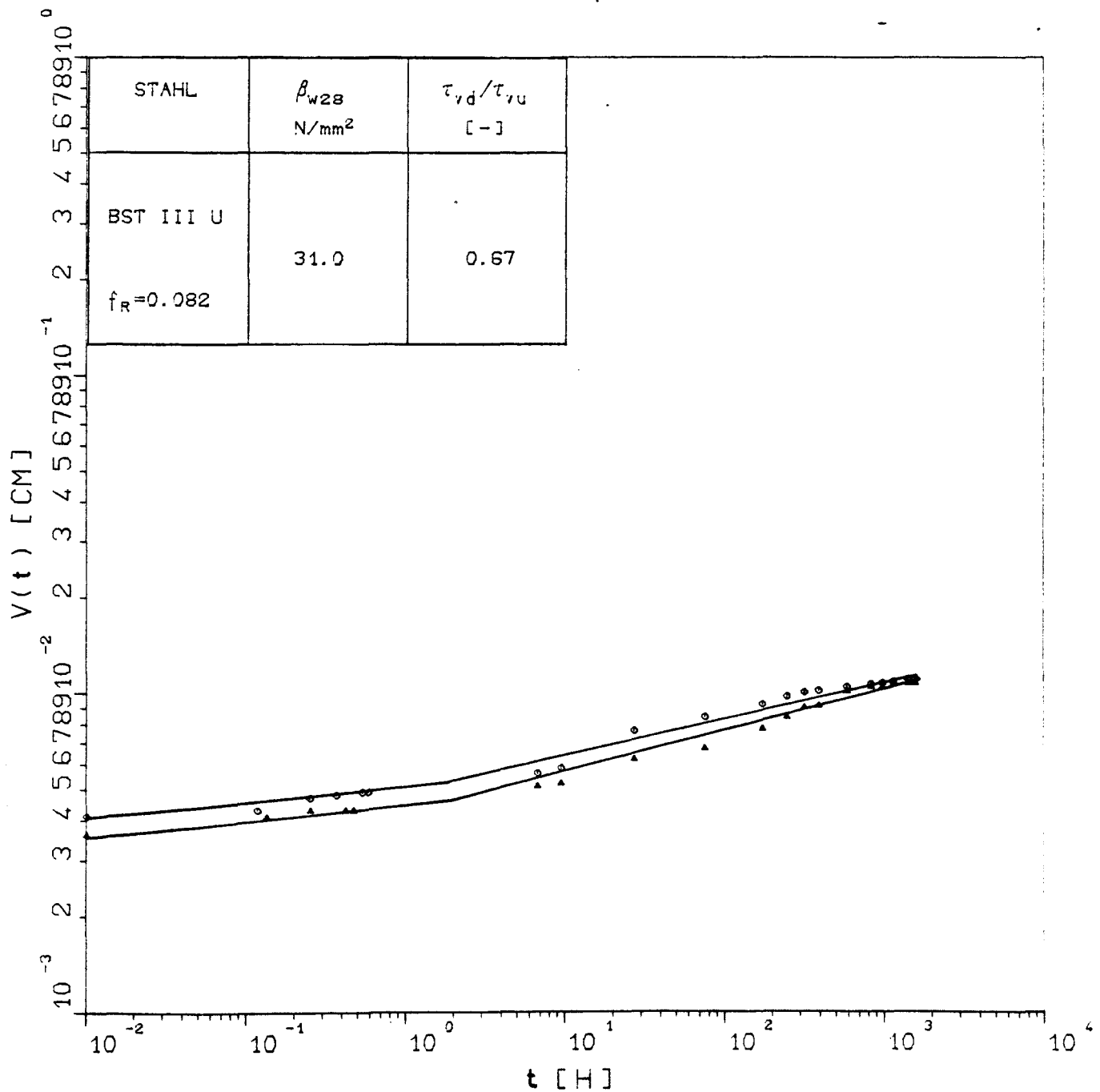
$v(t)$ - t -Beziehungen des Dauerstandversuches AKE1.06, Randlage 1 ds



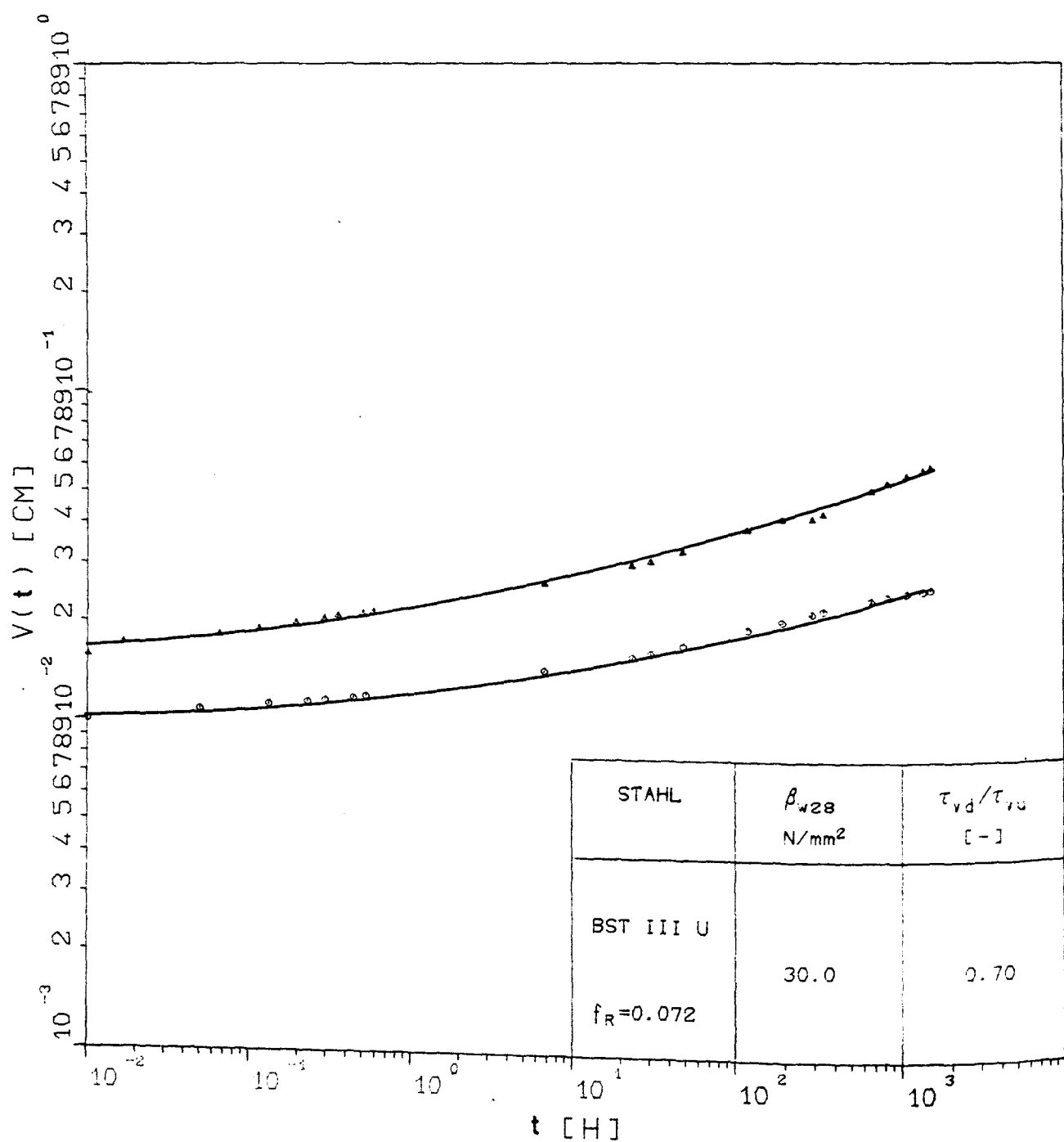
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKE2.03 und AKE2.06, zentrisch



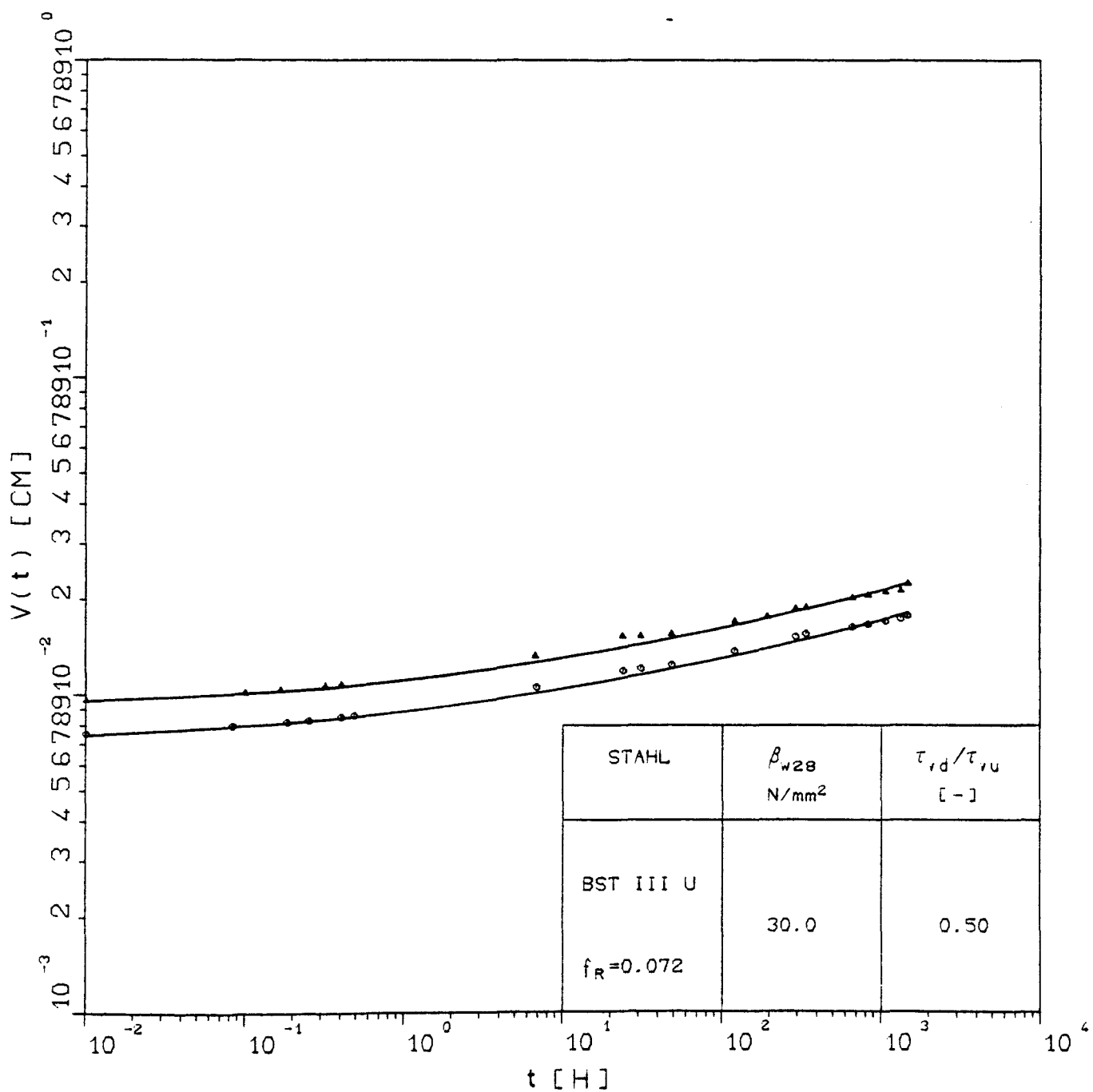
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKE2.05 und AKE2.01, Ecklage 2



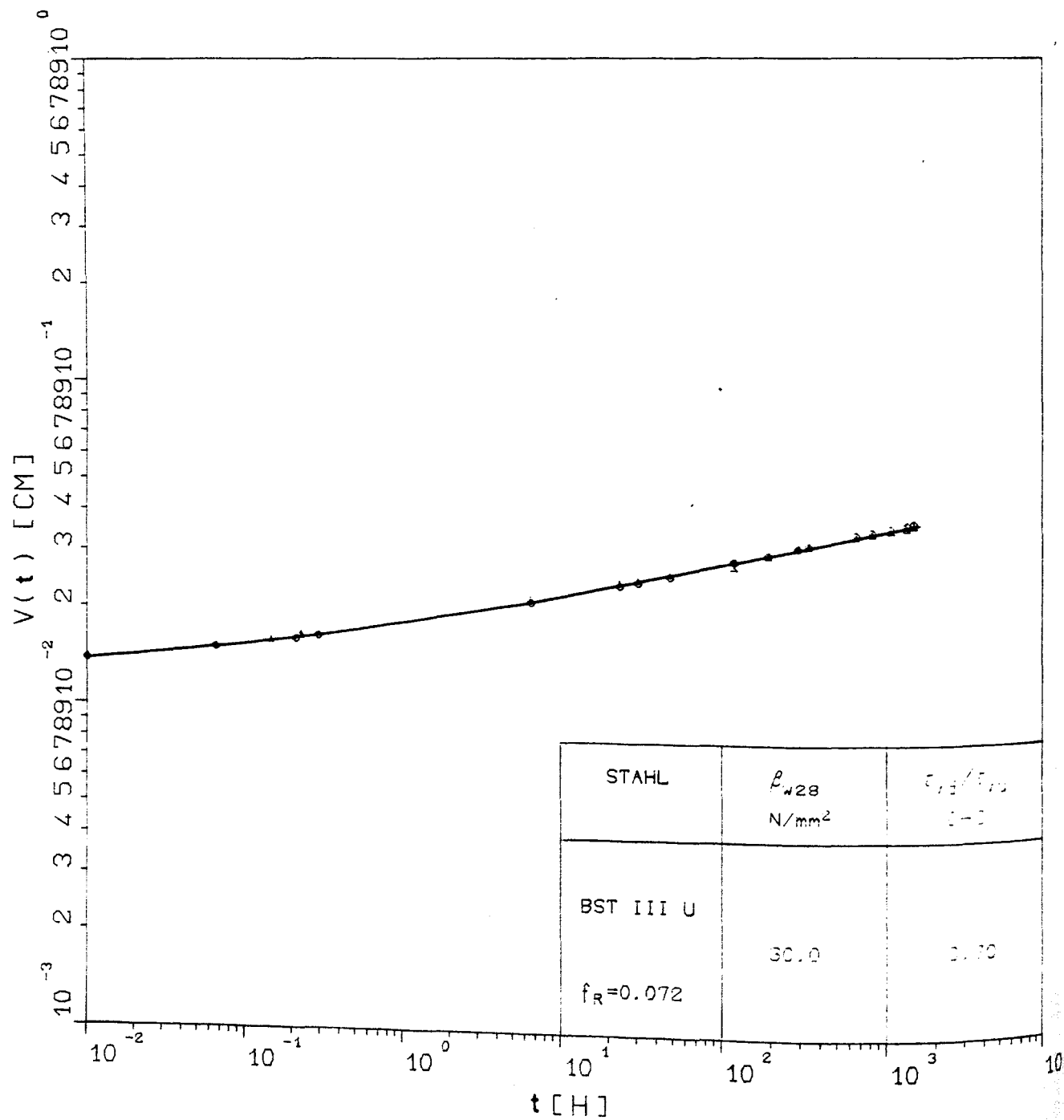
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKE2.03 und AKE2.07, Ecklage 2 ds



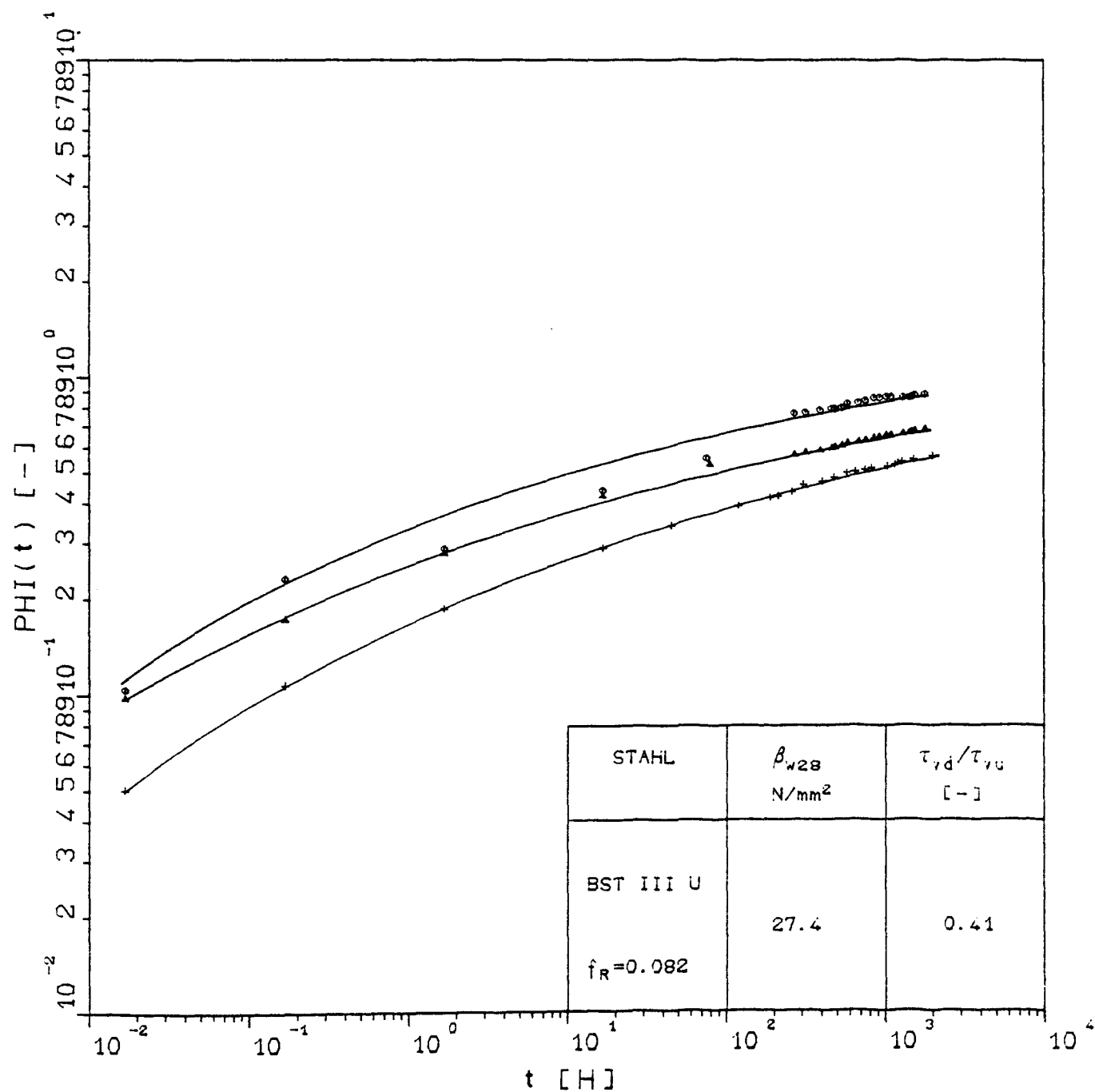
v (t)-t-Beziehungen der Dauerstandversuche AKE4.25 und AKE4.26, Randlage



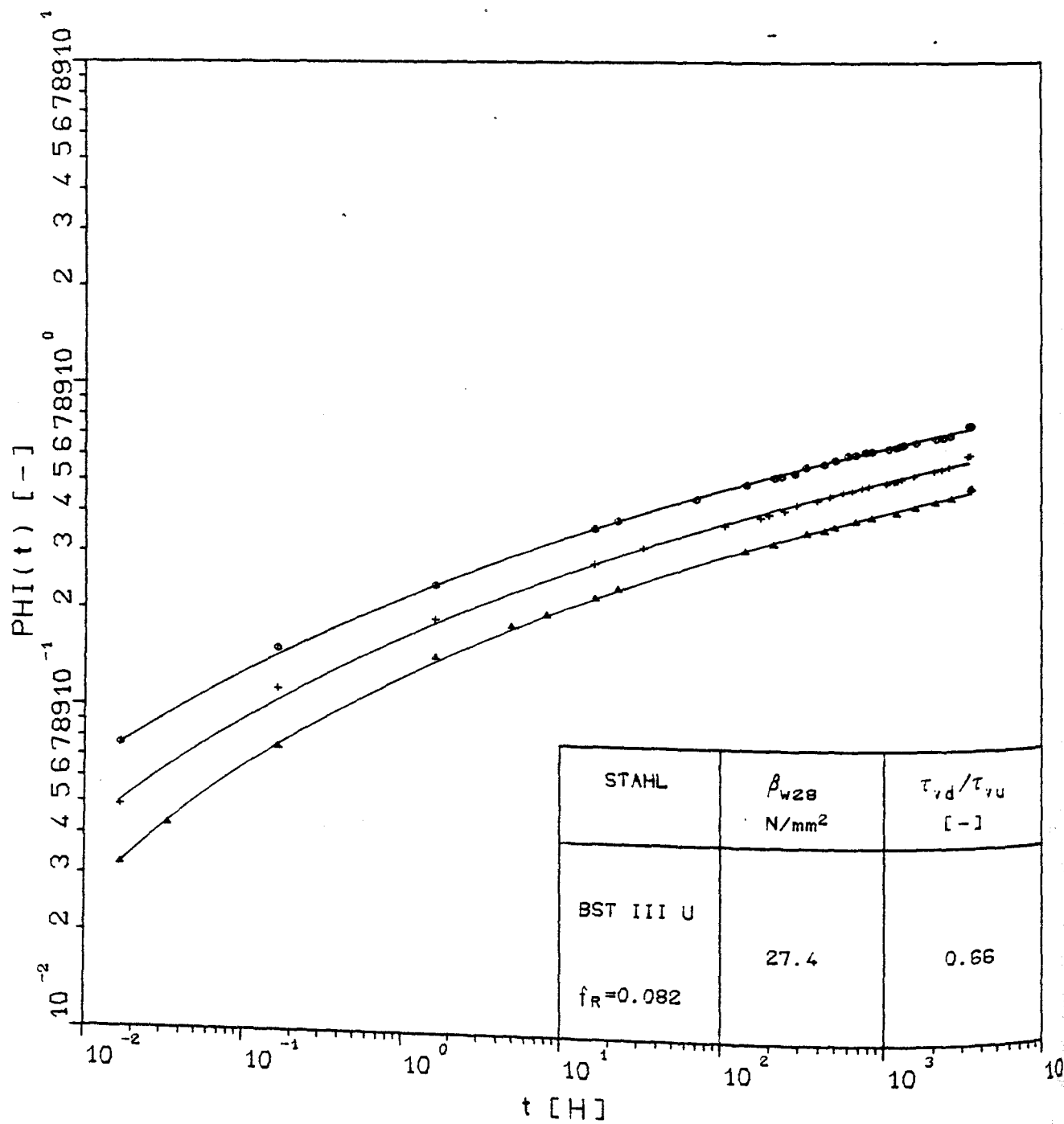
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKE4.17 und AKE.20, Randlage 2 ds



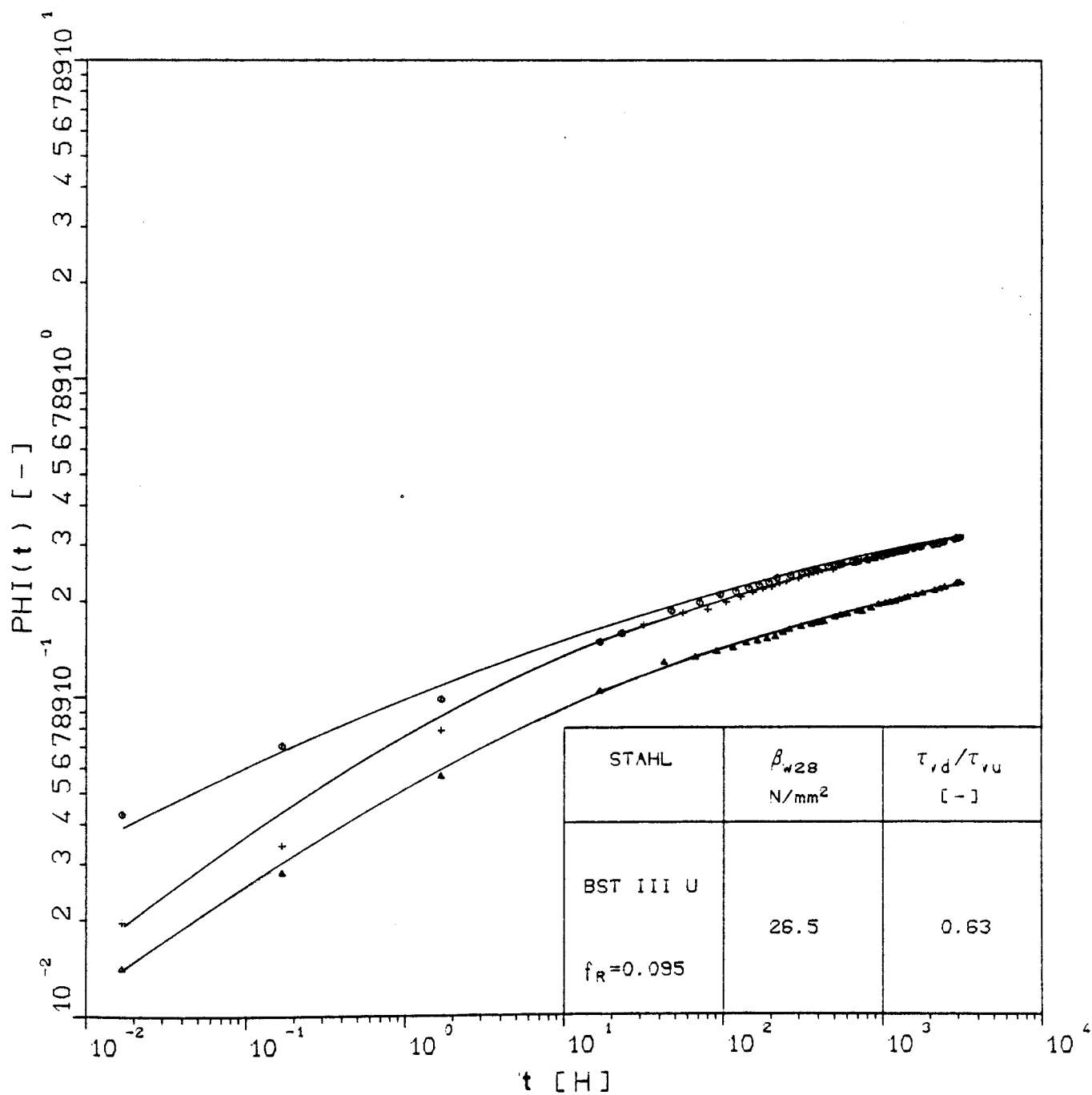
$v(t)$ - t -Beziehungen der Dauerstandversuche AKE4.19 und AKE4.21, Randlage 2



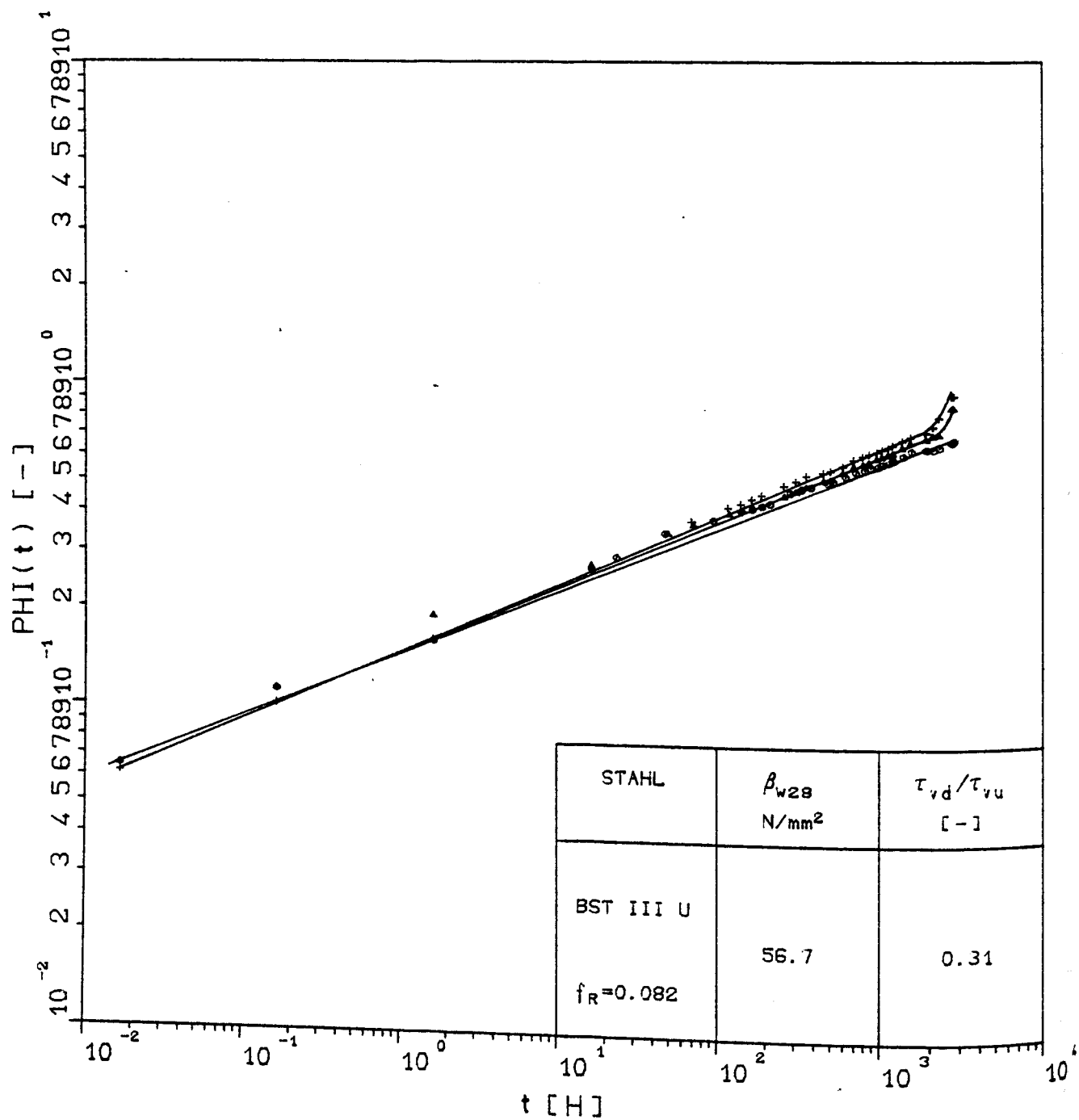
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKZ2.09, AKZ2.10 und AKZ2.16



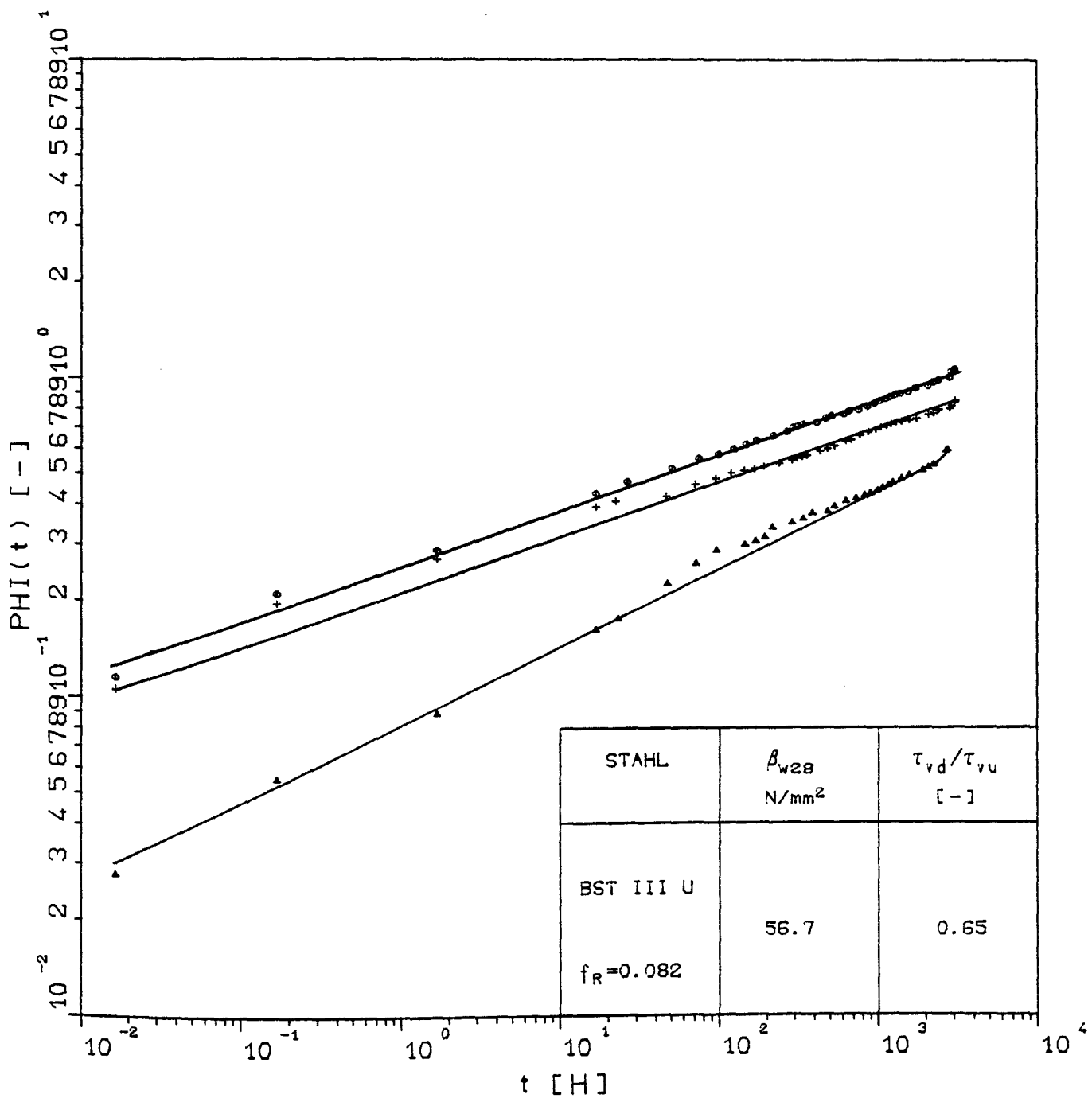
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKZ2.04, AKZ2.05 und AKZ2.15



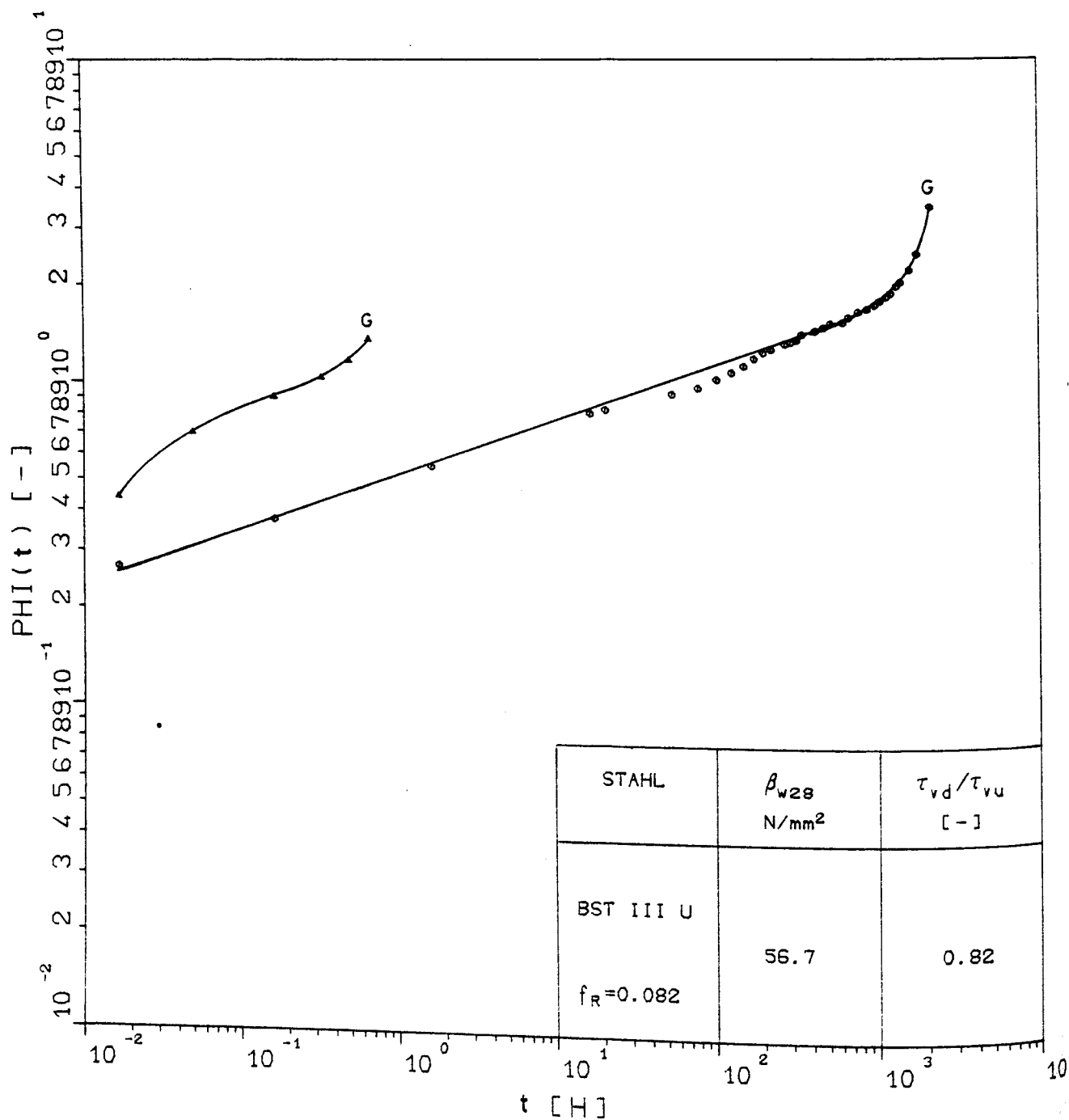
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKZ3.15, AKZ3.18 und AKZ3.20



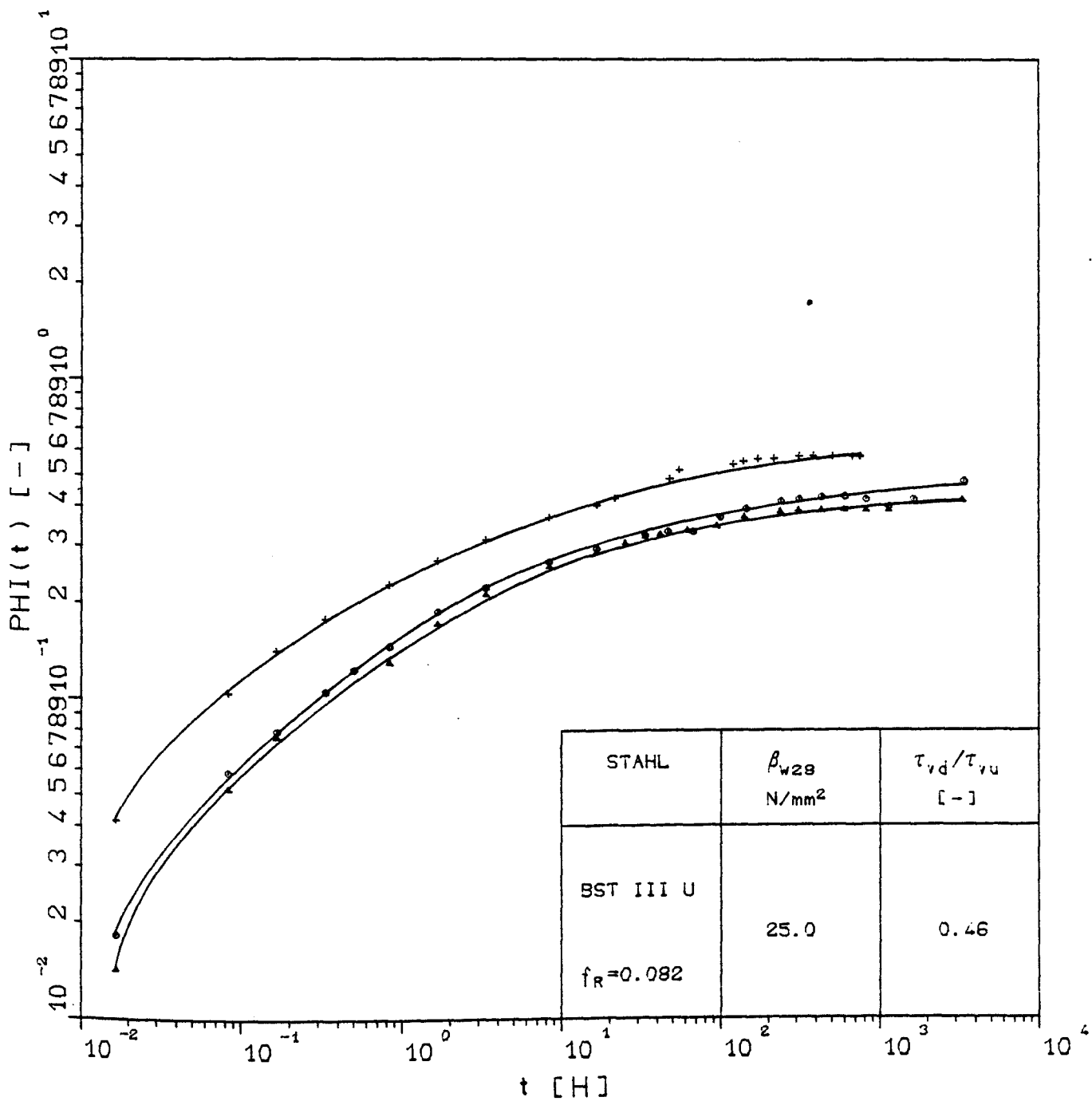
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKZ4.01, AKZ4.07 und AKZ4.13



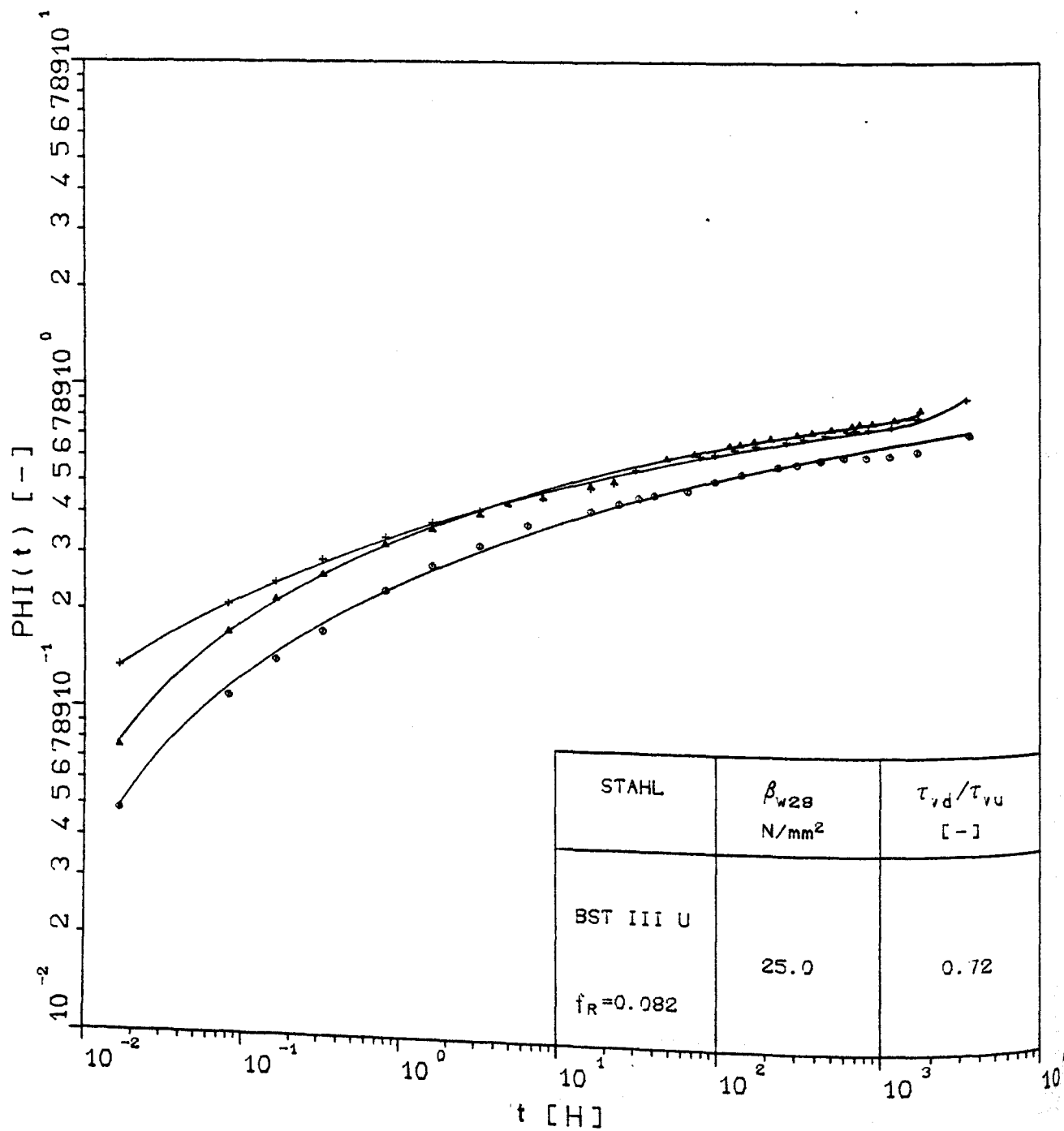
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKZ4.03, AKZ4.05 und AKZ4.08



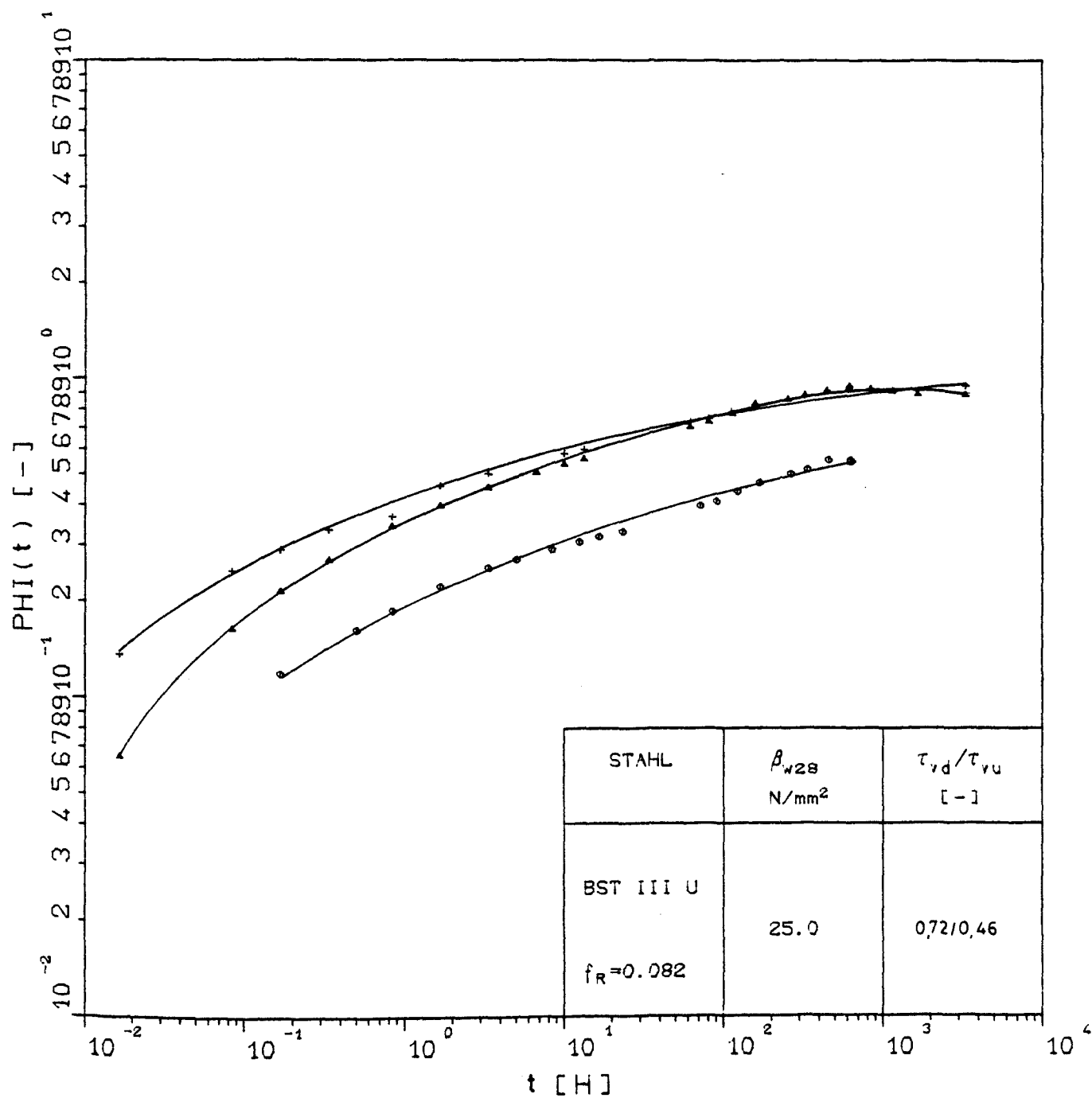
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKZ4.14 und AKZ4.04



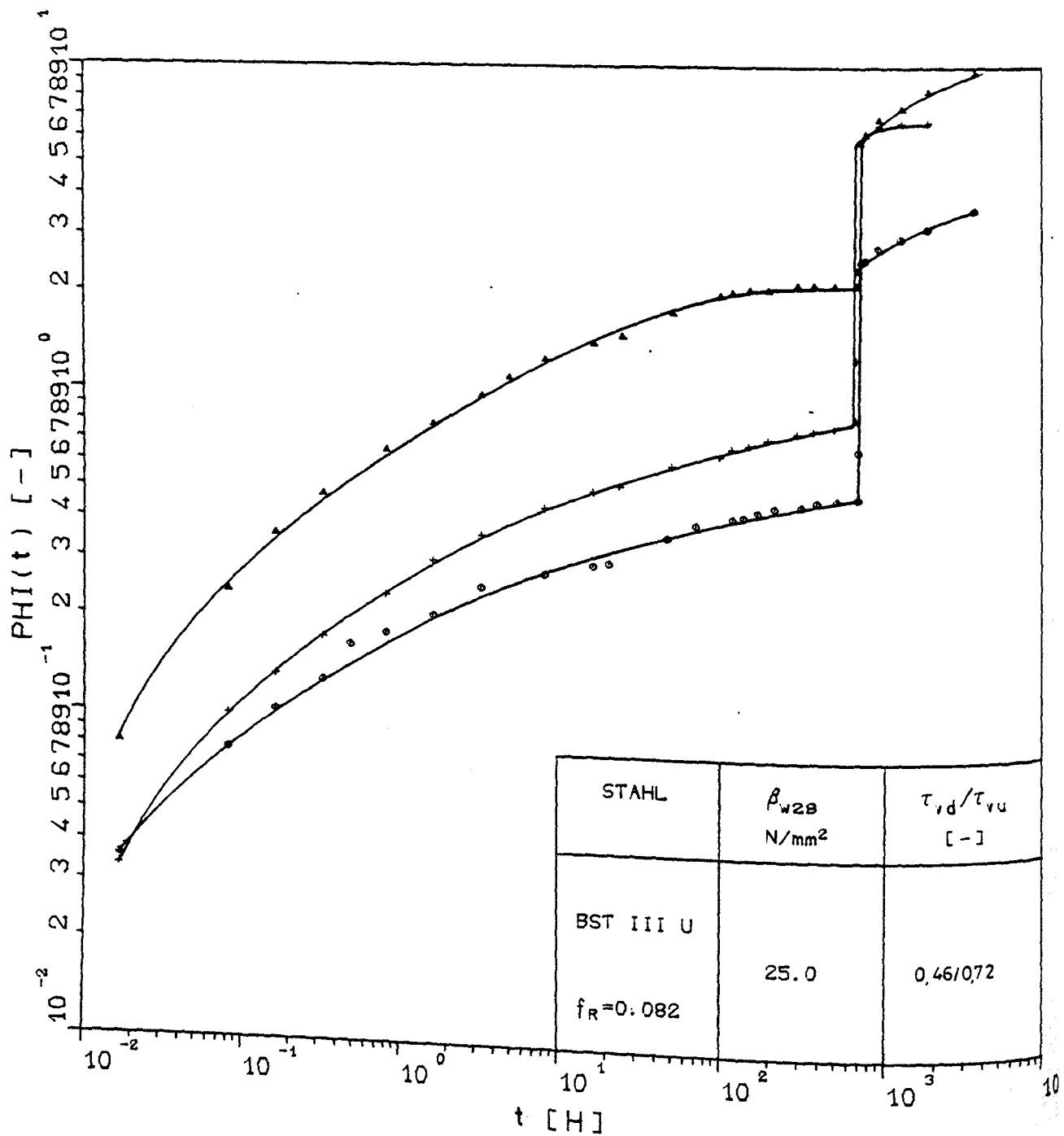
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche
AKZ6.04, AKZ6.05 und AKZ6.12



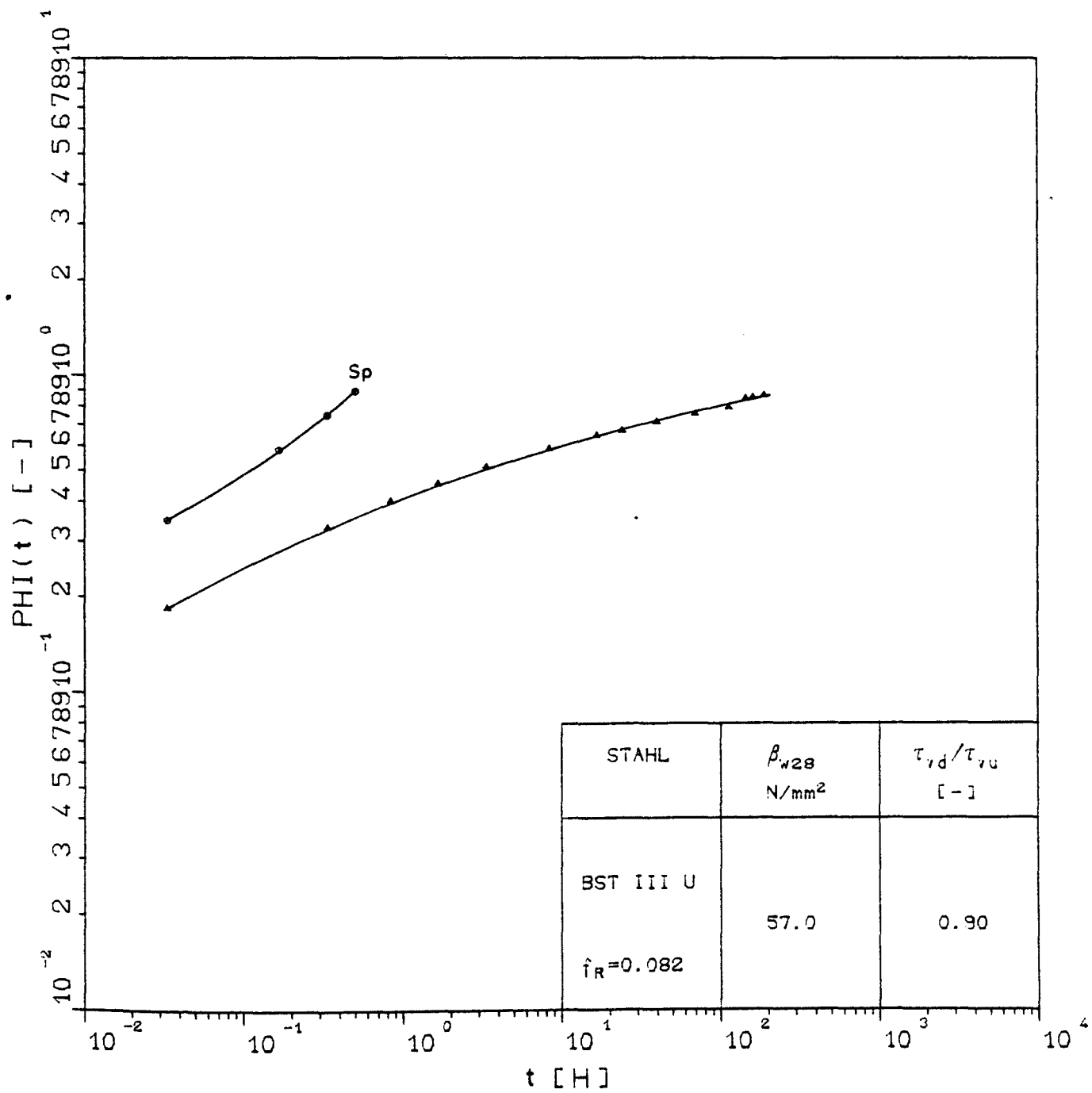
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKZ6.06, AKZ6.11 und AKZ6.15



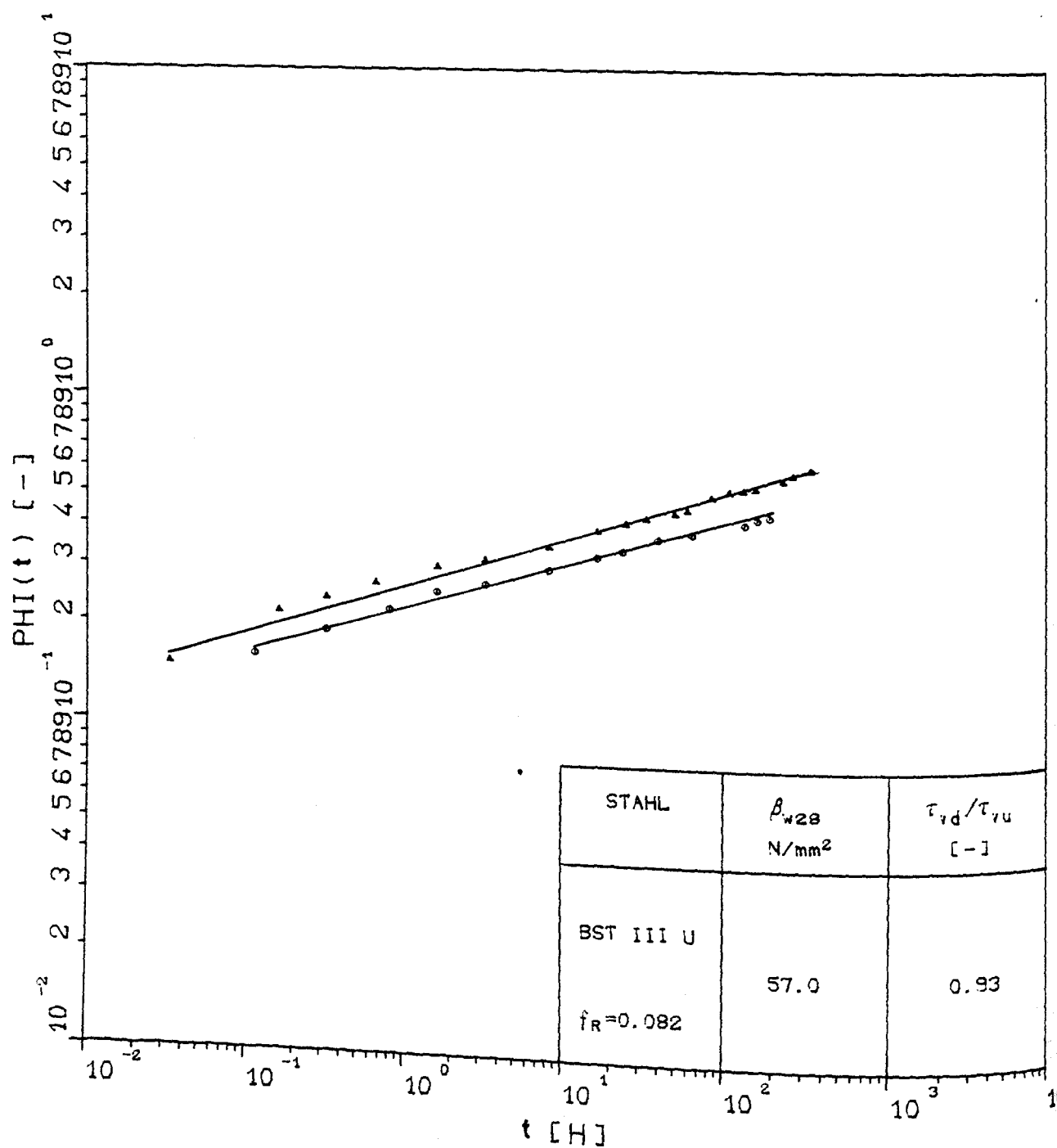
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKZ6.01, AKZ6.02 und AKZ6.03



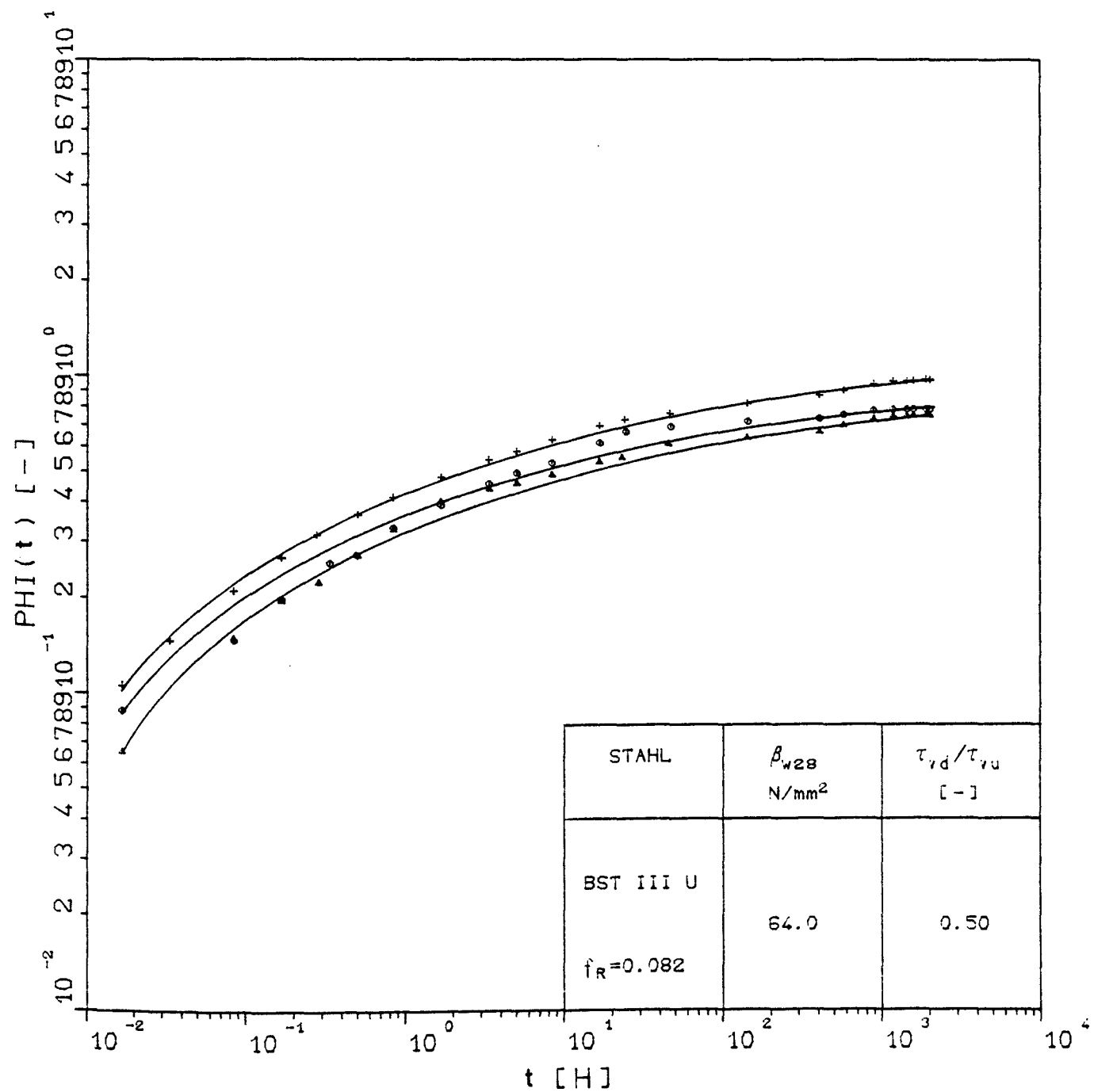
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKZ6.10, AKZ6.13 und AKZ6.14



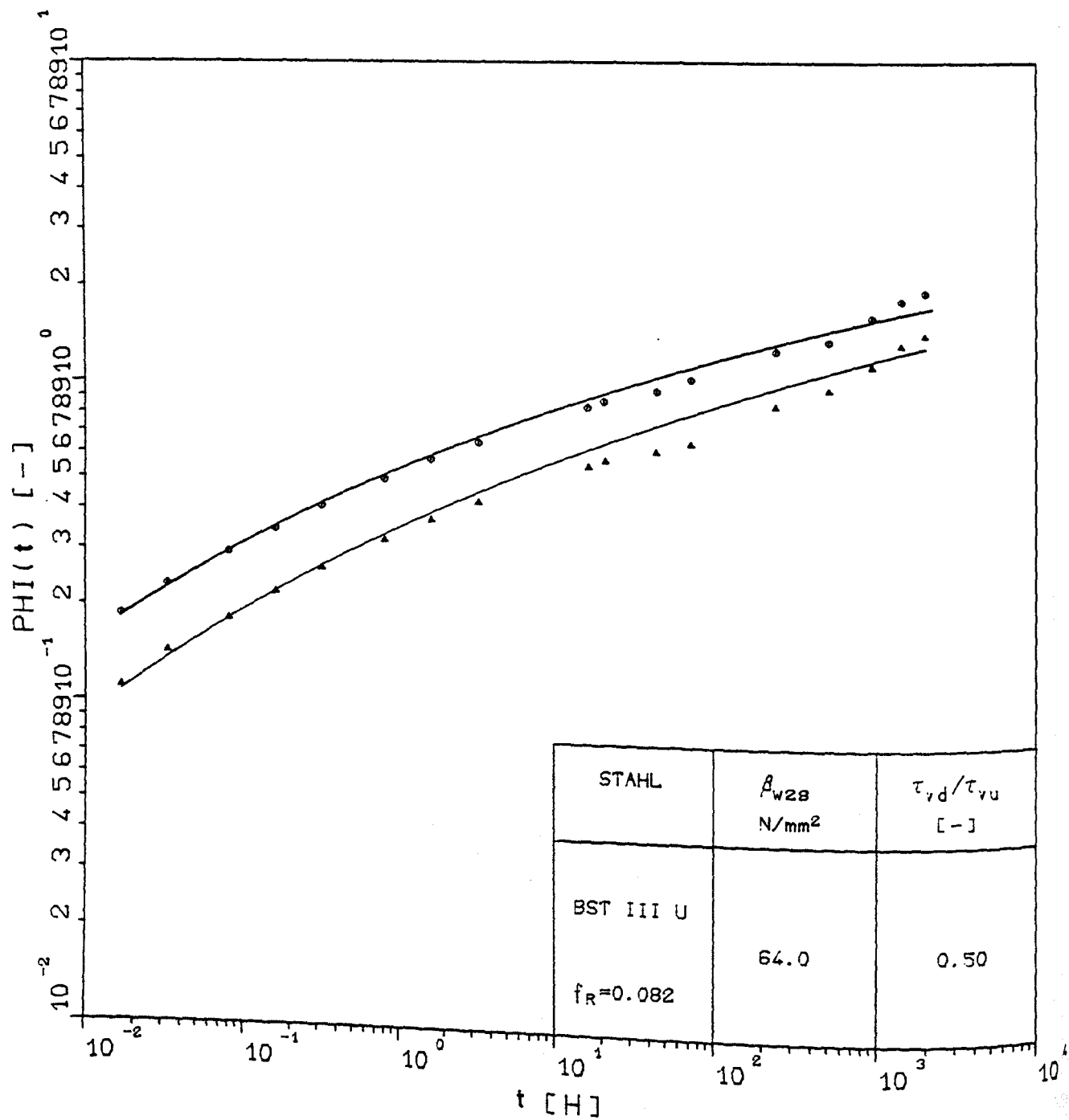
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKZ7.02 und AKZ7.08



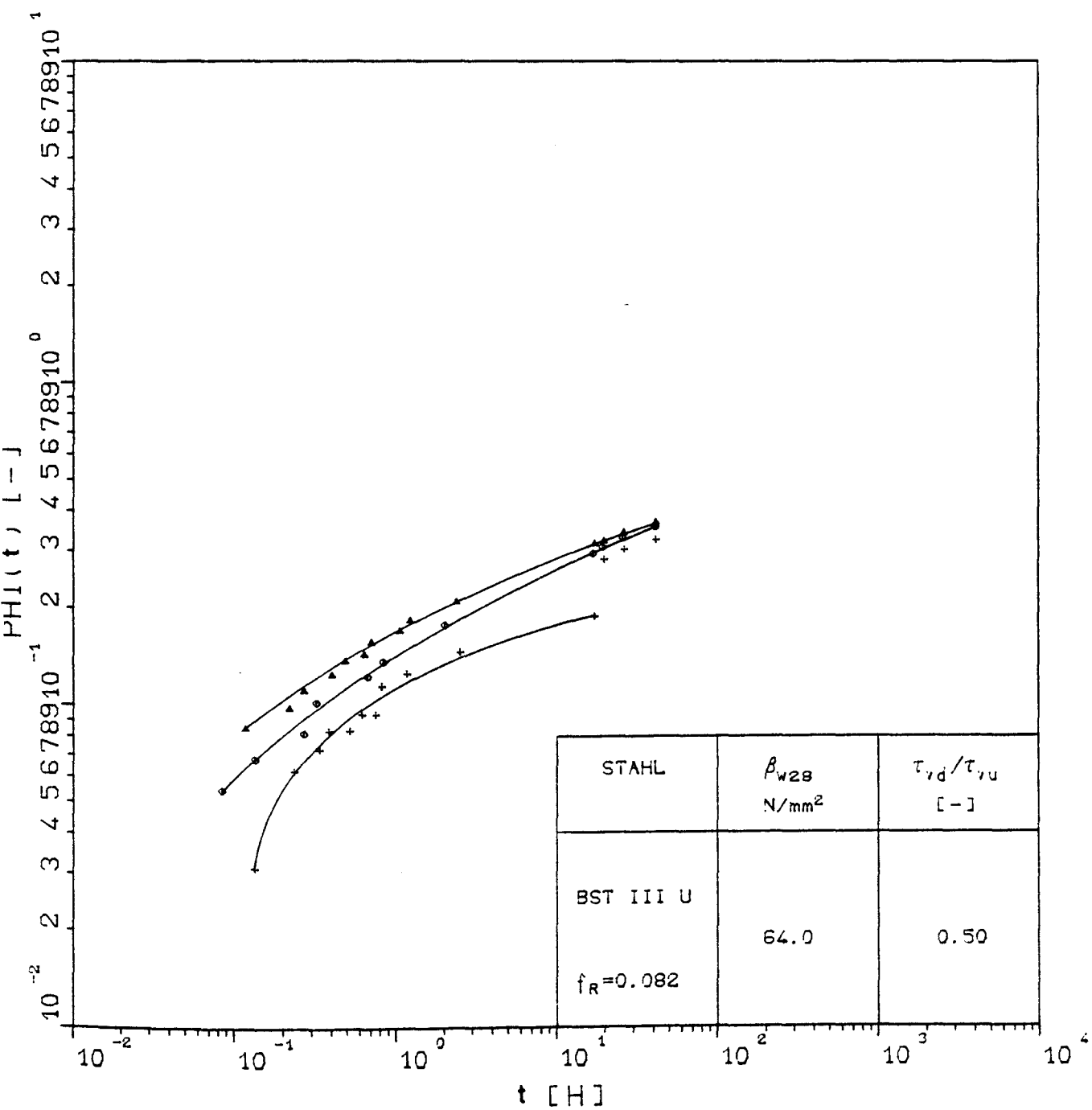
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKZ7.05 und AKZ7.14



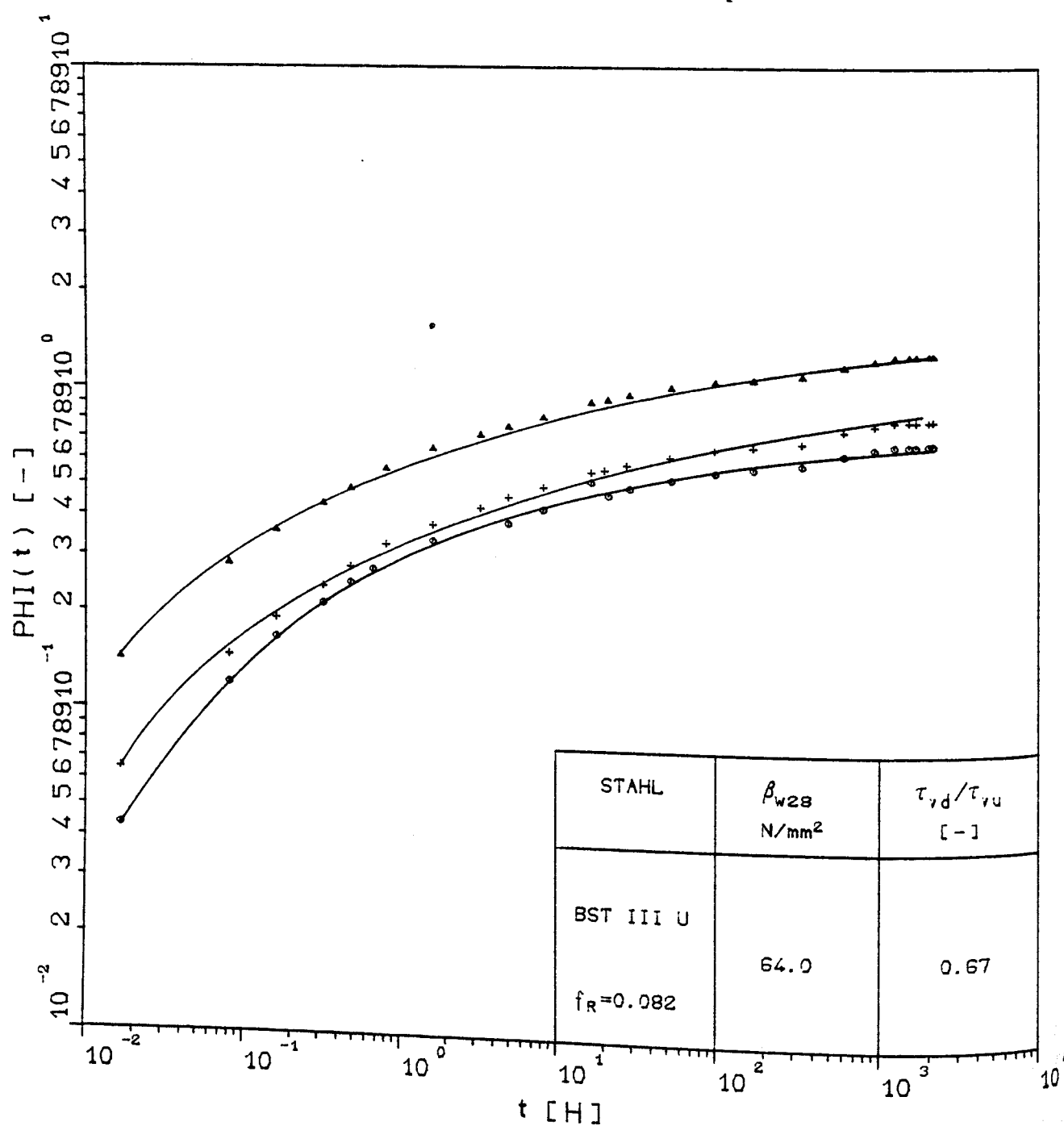
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKZ8.04, AKZ8.05 und AKZ8.06



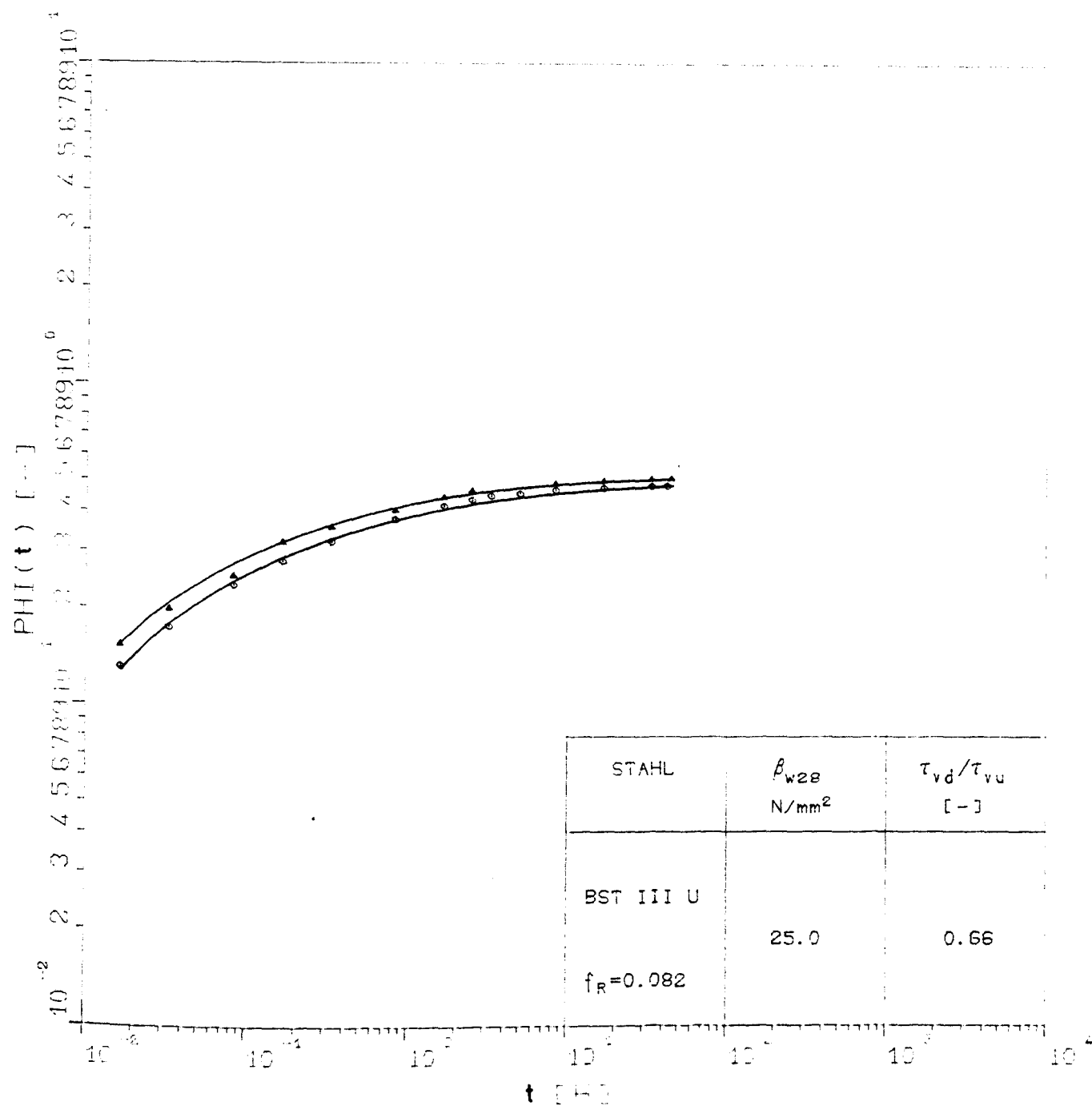
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKZ8.16 und AKZ8.19



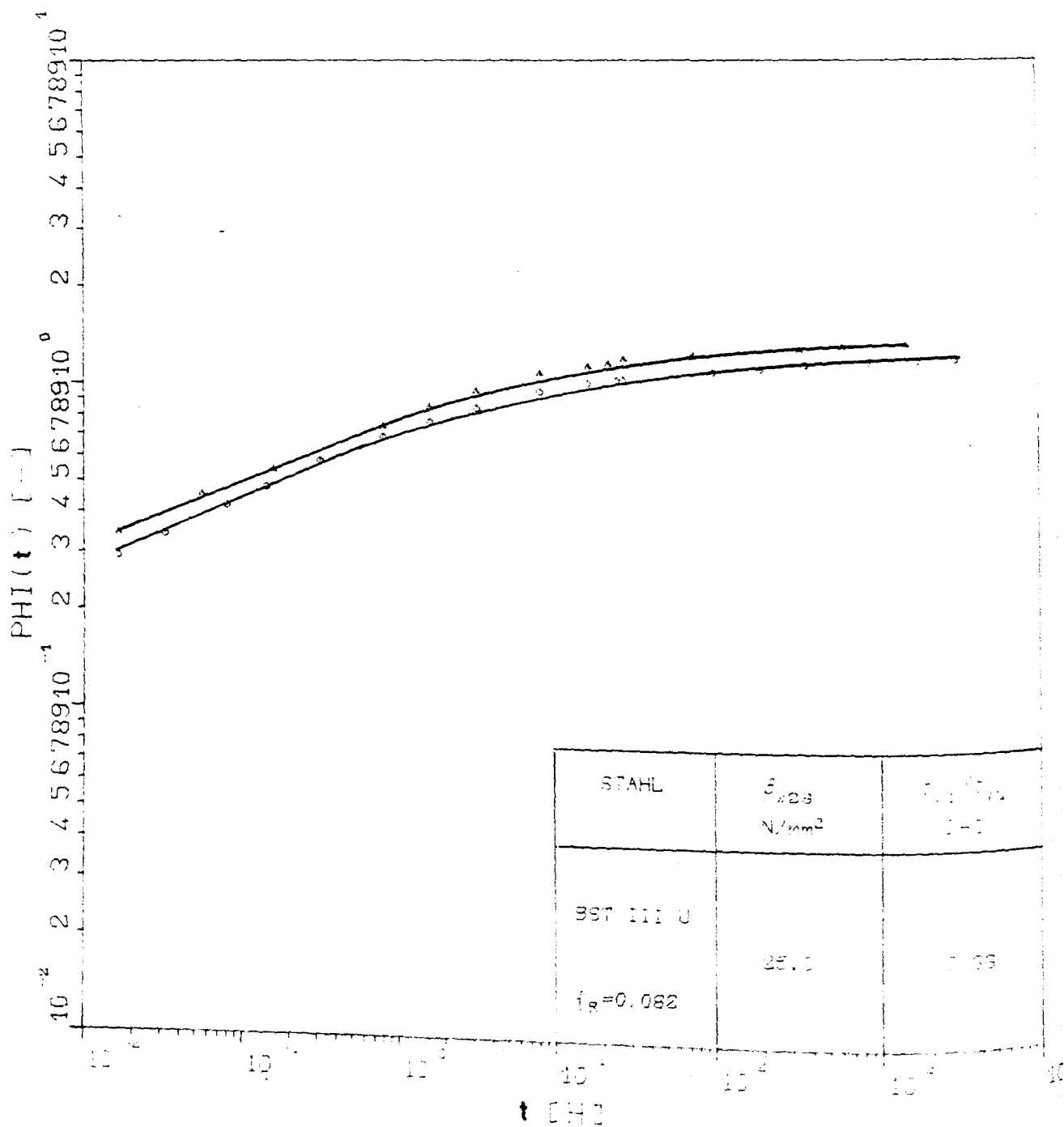
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKZ8.12, AKZ8.14 und AKZ8.18



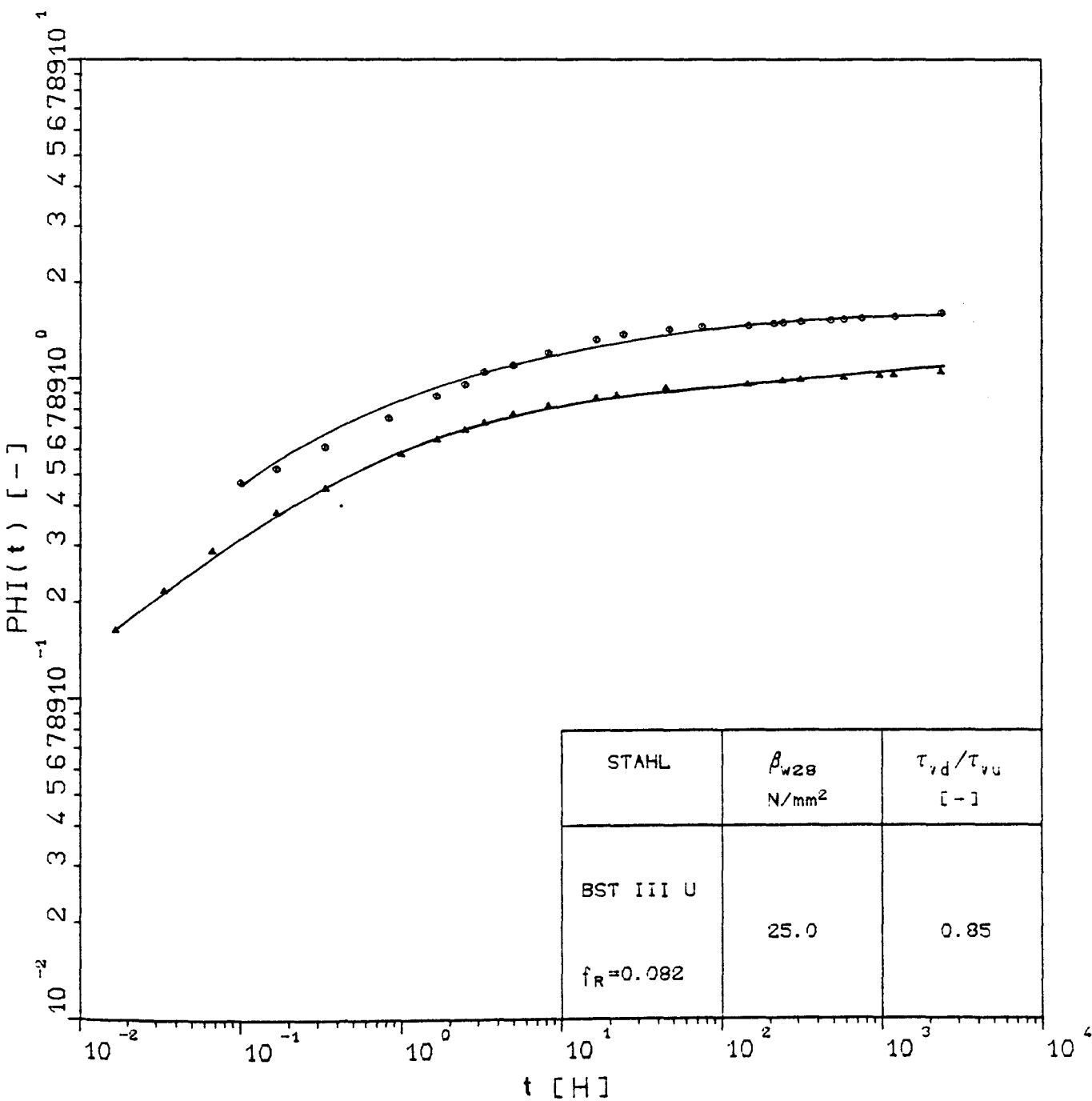
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKZ8.07, AKZ8.08 und AKZ8.09



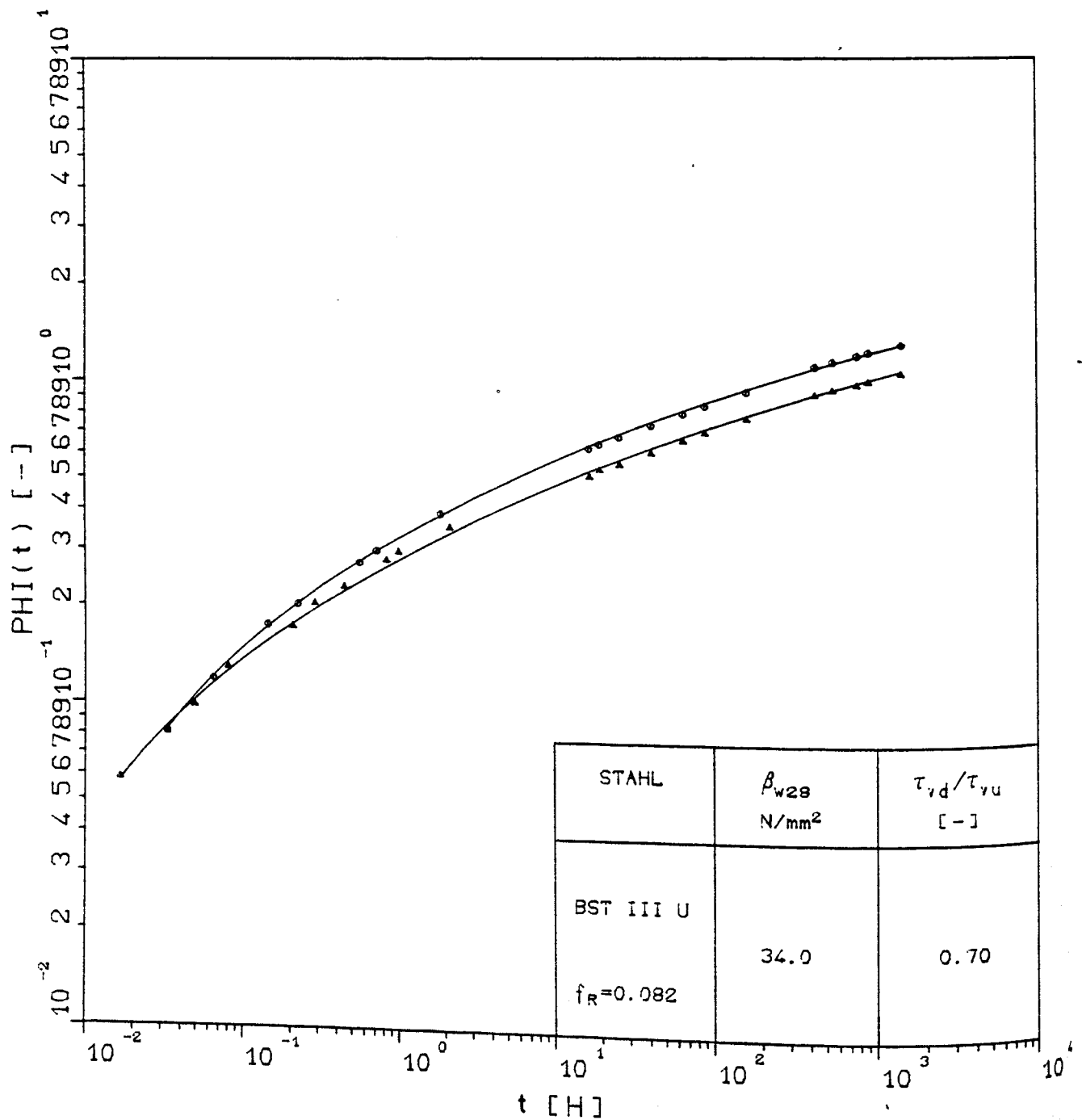
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche
AKZ9.05 und AKZ9.06



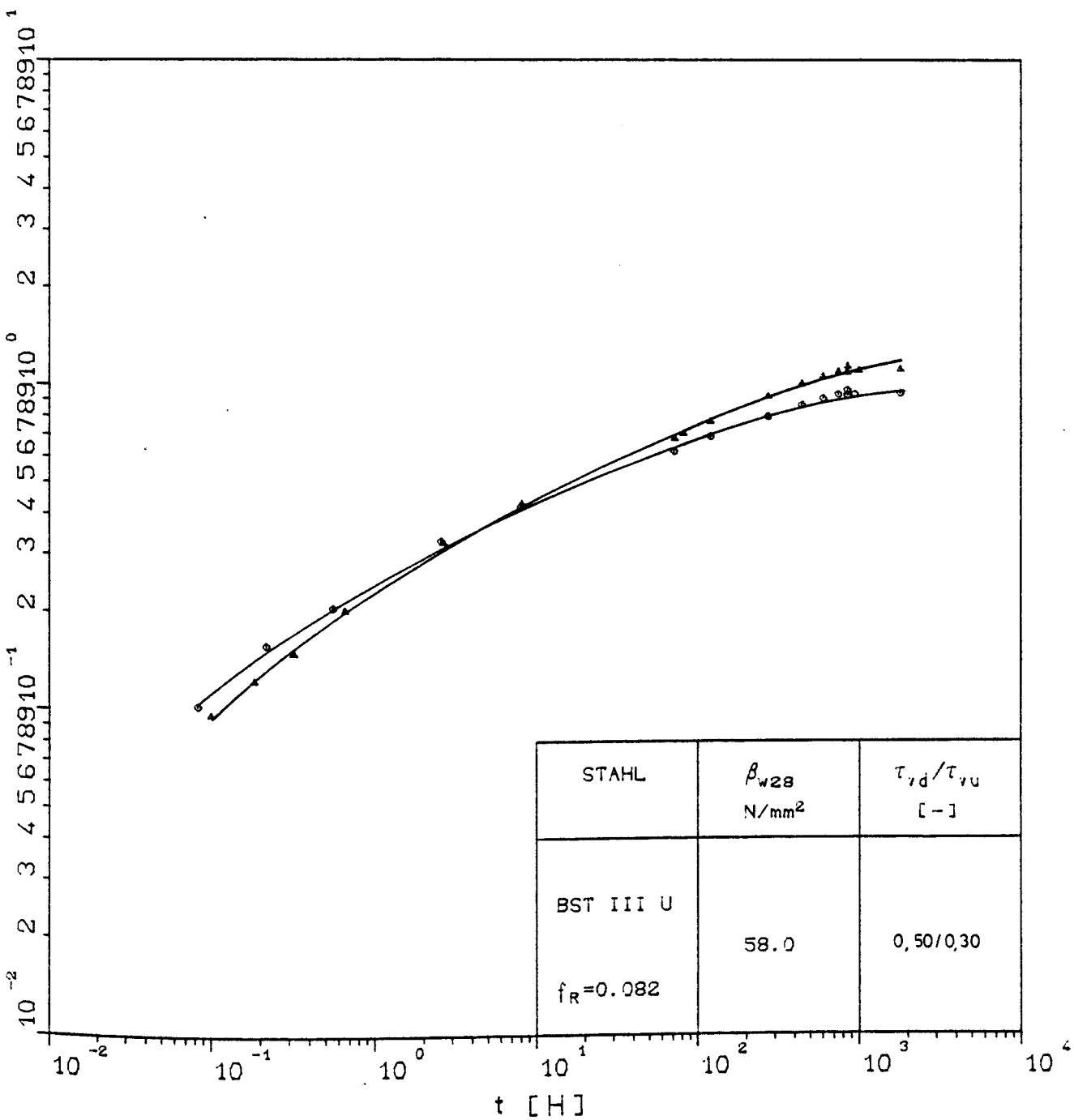
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKZ9.13 und AKZ9.19



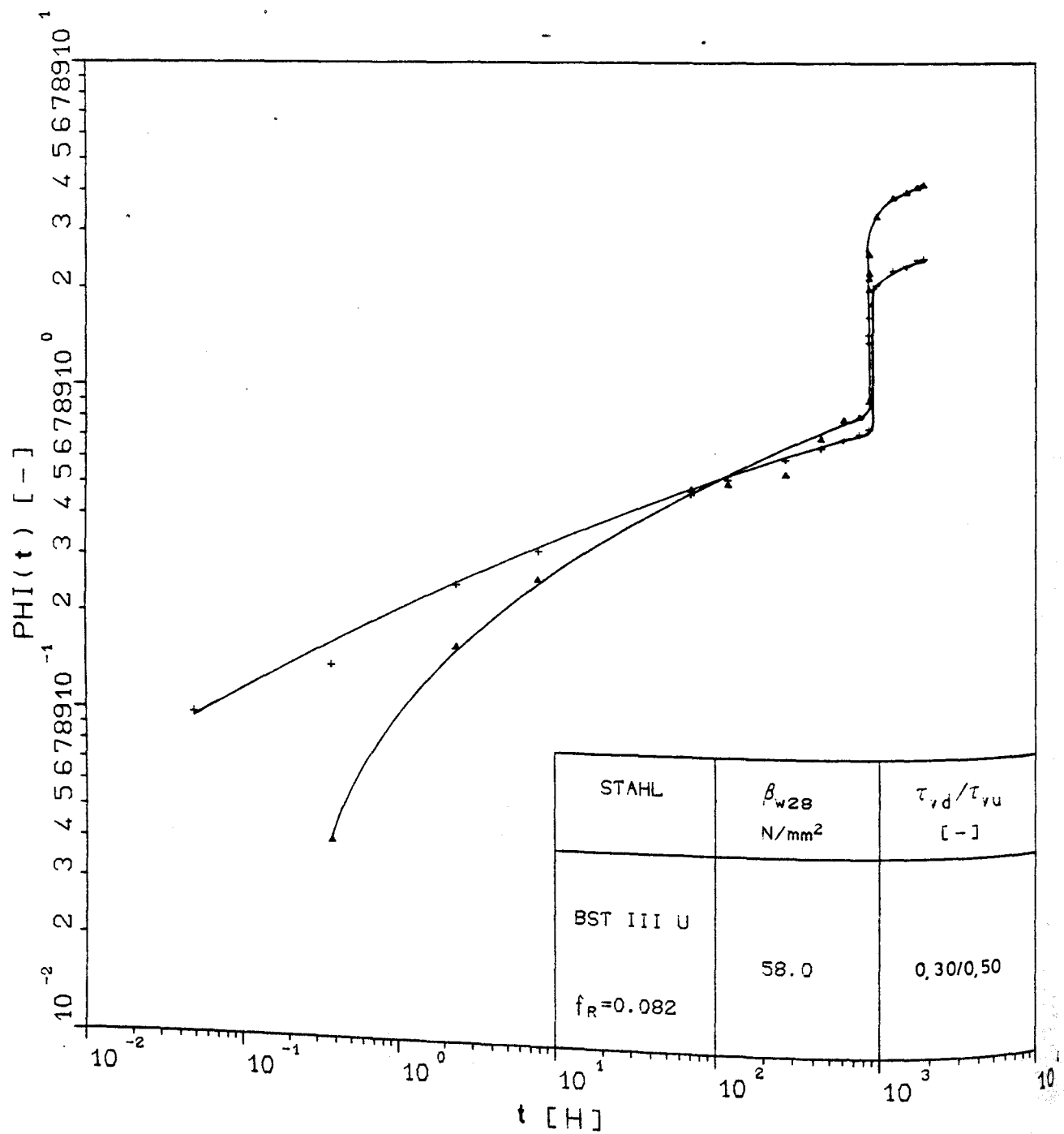
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKZ9.07 und AKZ9.11



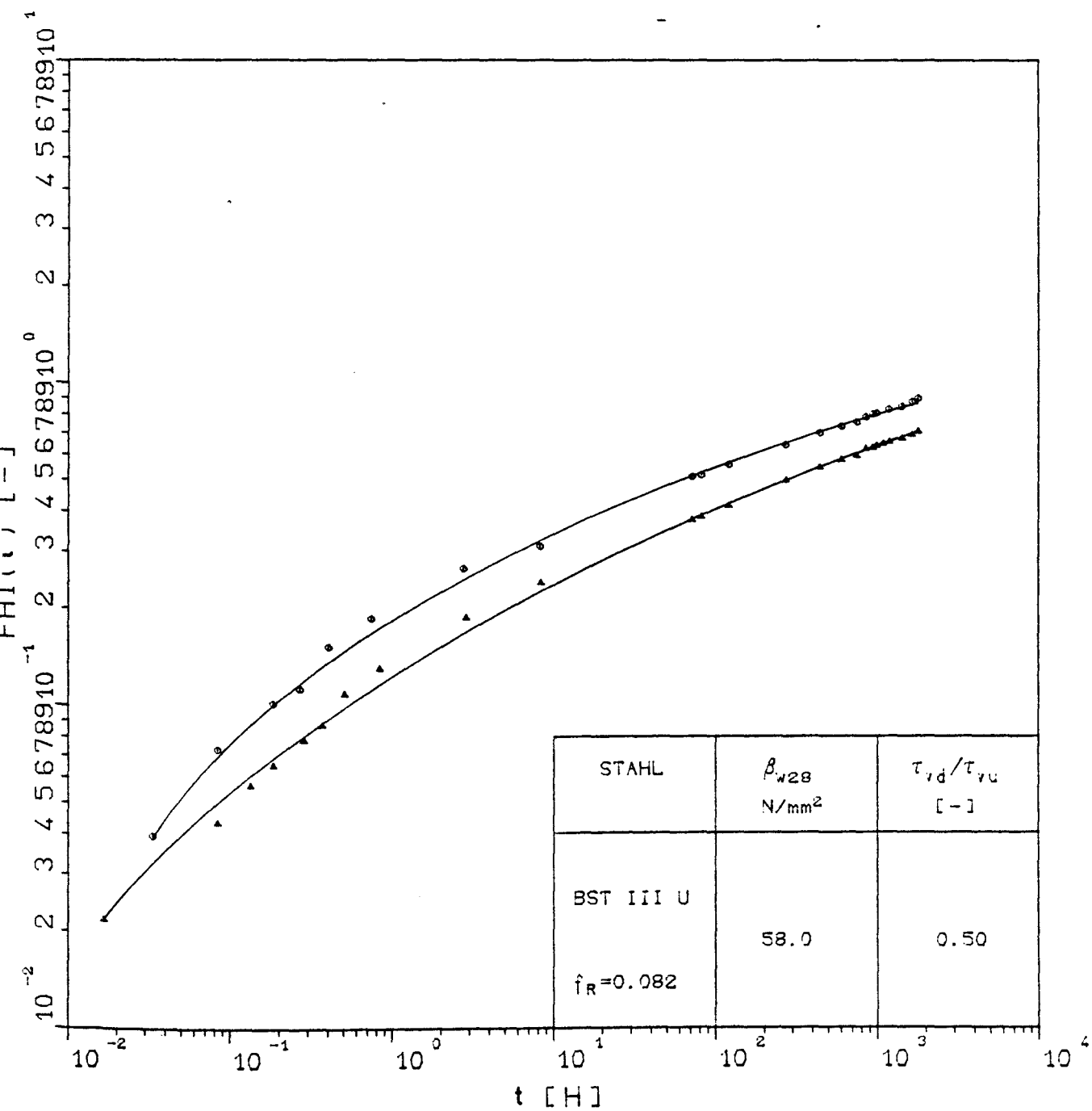
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKZ10.02 und AKZ10.16



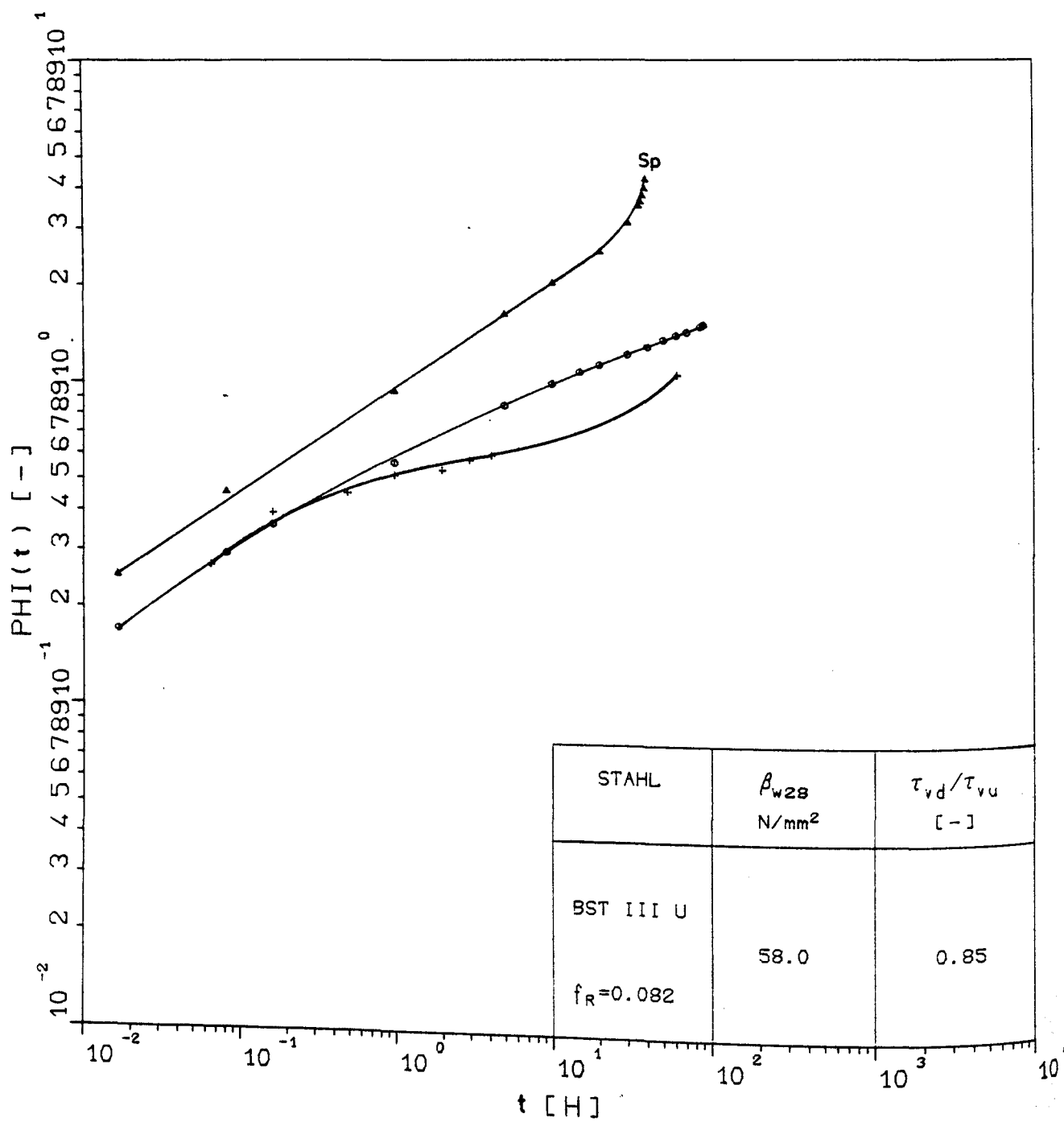
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKZ11.13 und AKZ11.18



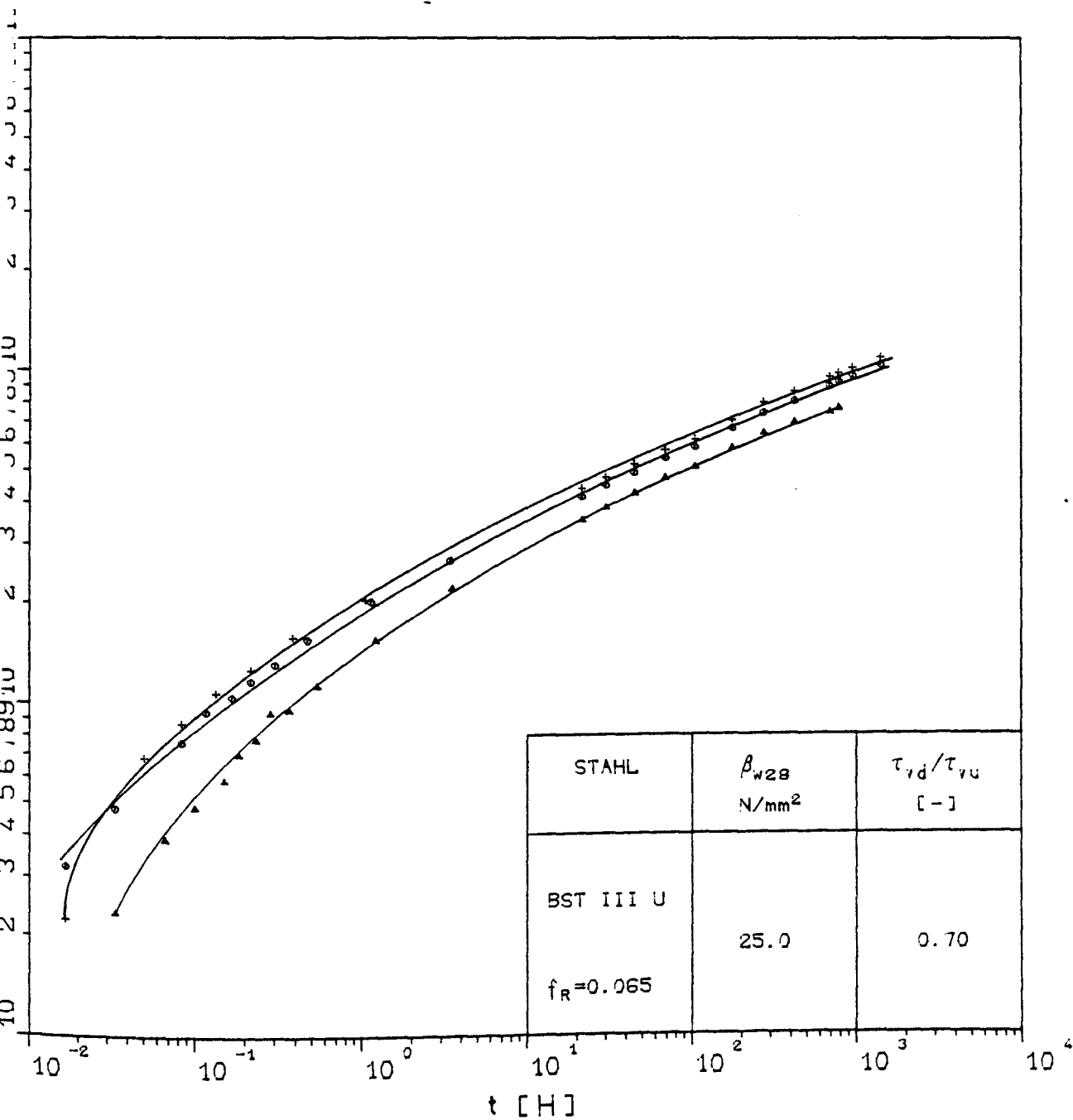
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche
AKZ11.11 und AKZ11.12



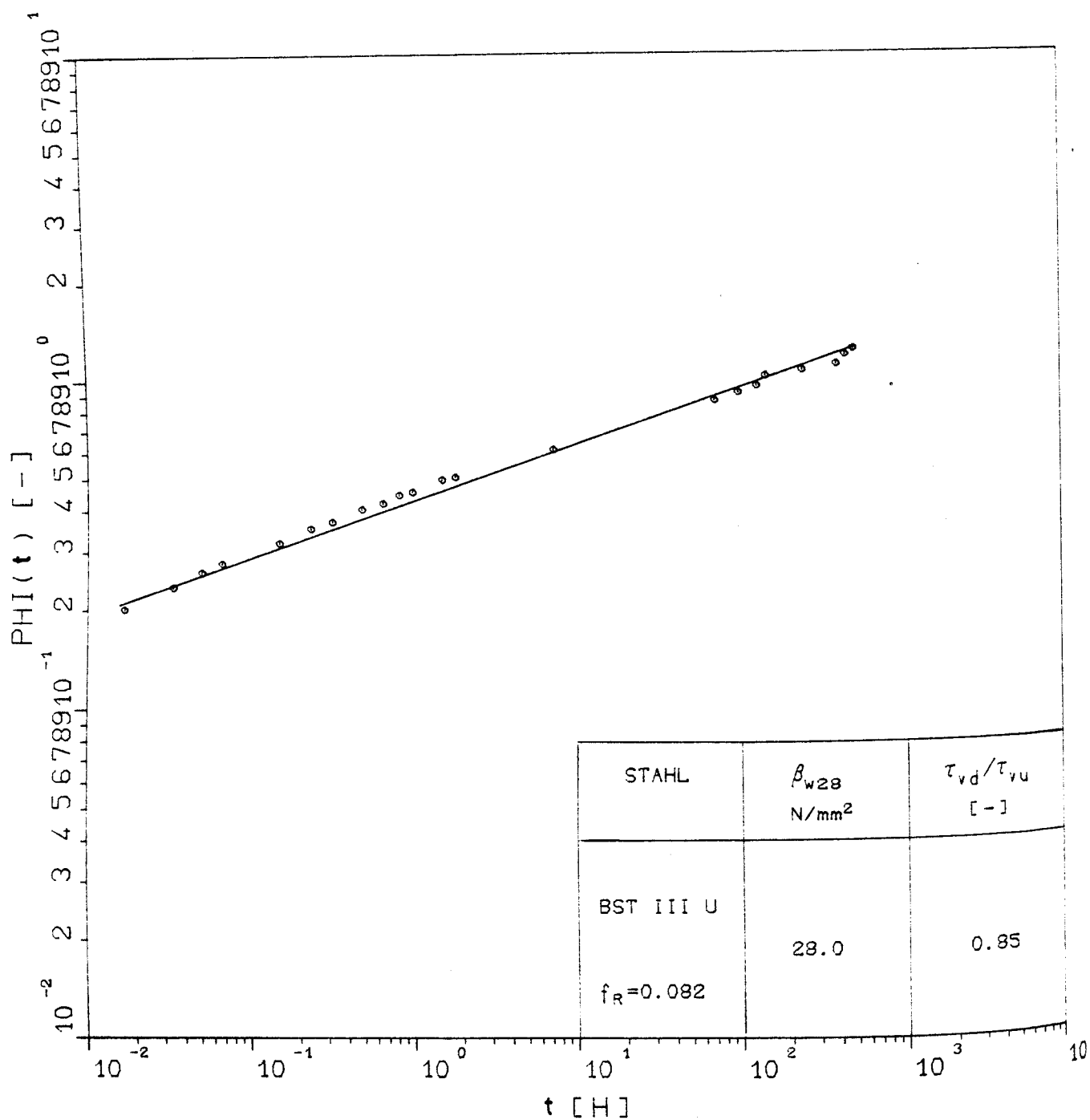
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKZ11.19 und AKZ11.20



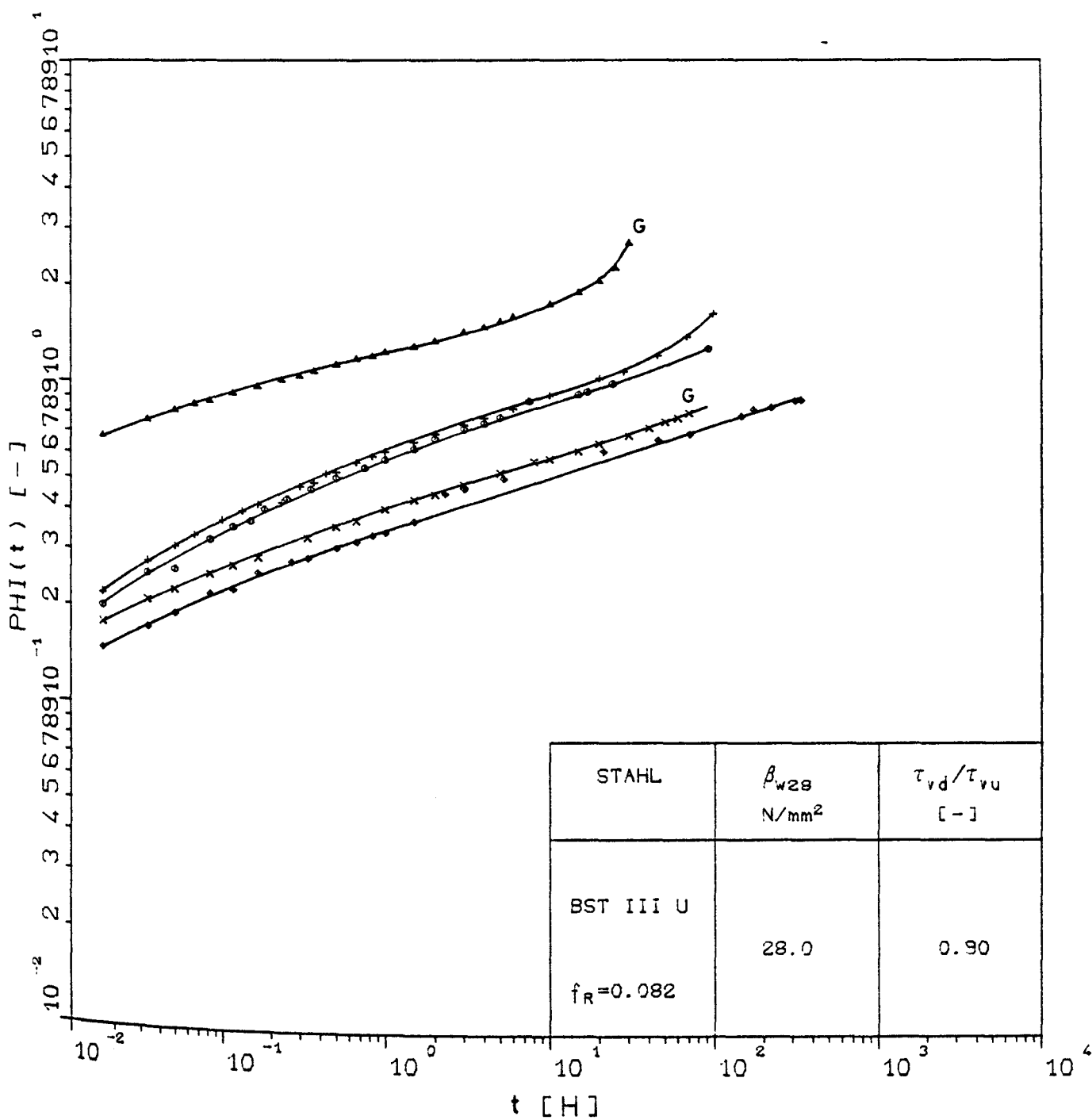
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKZ11.04, AKZ11.05 und AKZ11.07



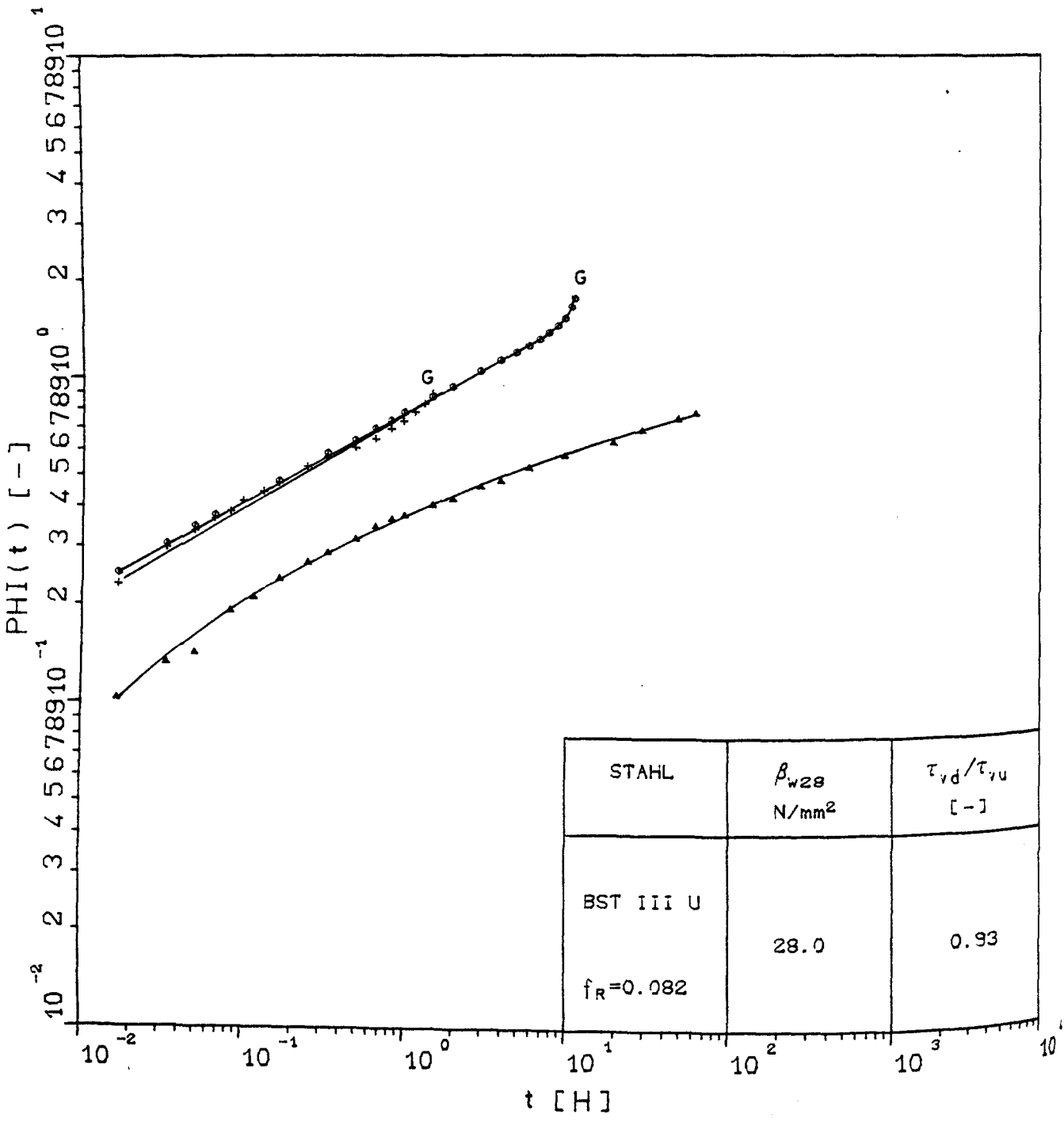
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche
AKZ12.08, AKZ12.12 und AKZ12.13



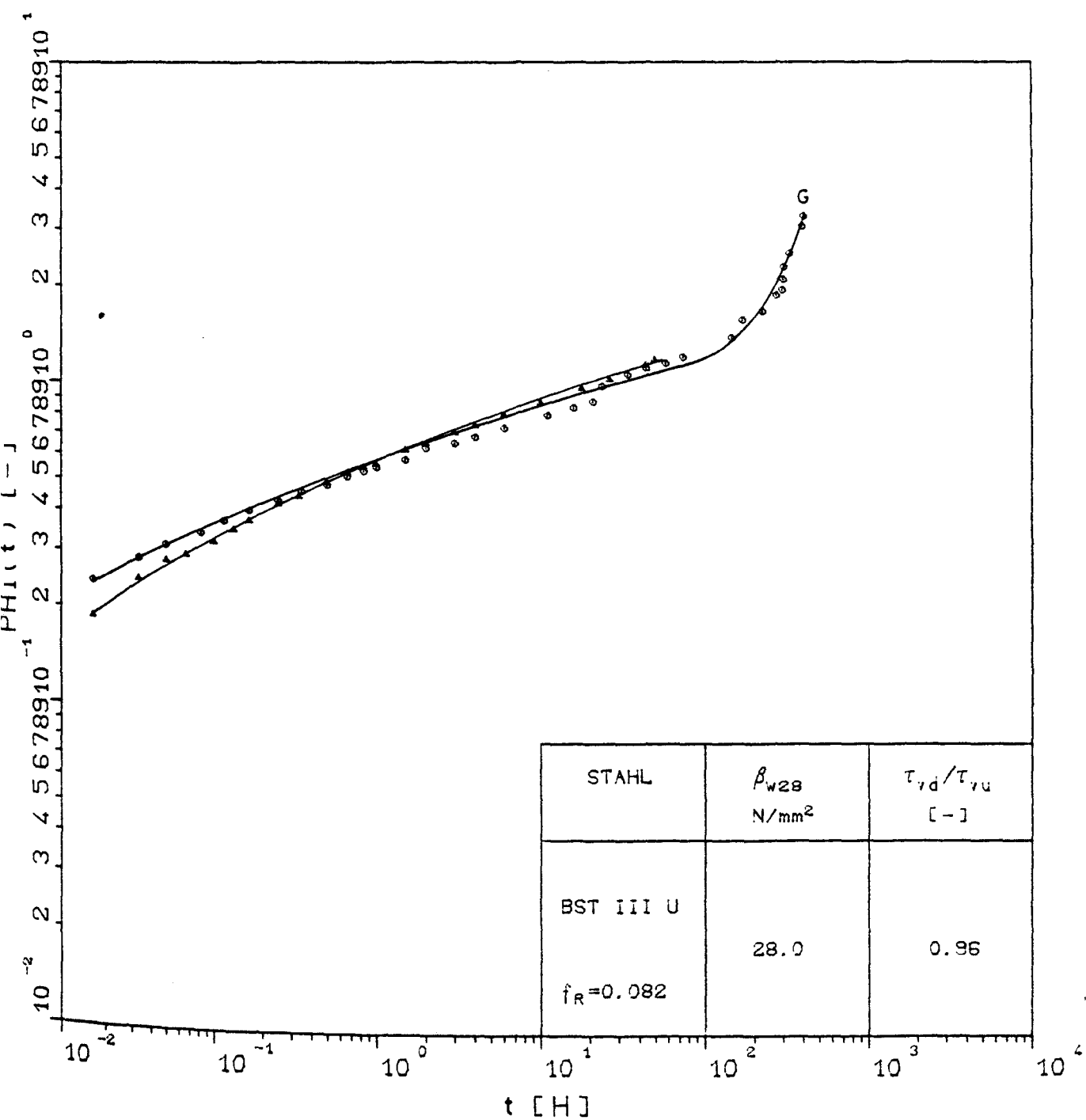
Kriechzahl in Abhängigkeit von der Zeit t für den Dauerstandversuch AKZ13.11



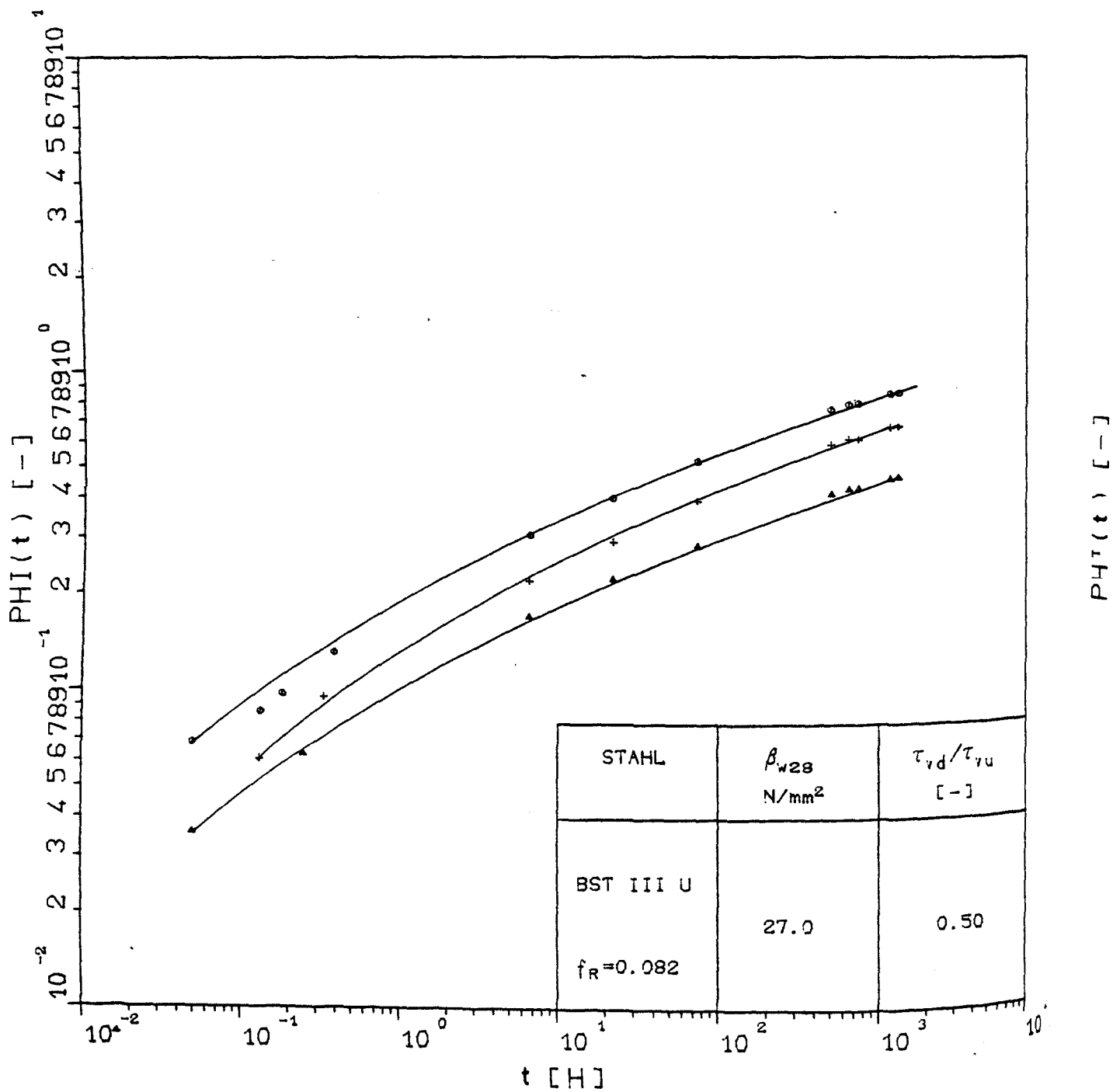
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKZ13.03, AKZ13.04, AKZ13.11, AKZ13.17 und AKZ13.18



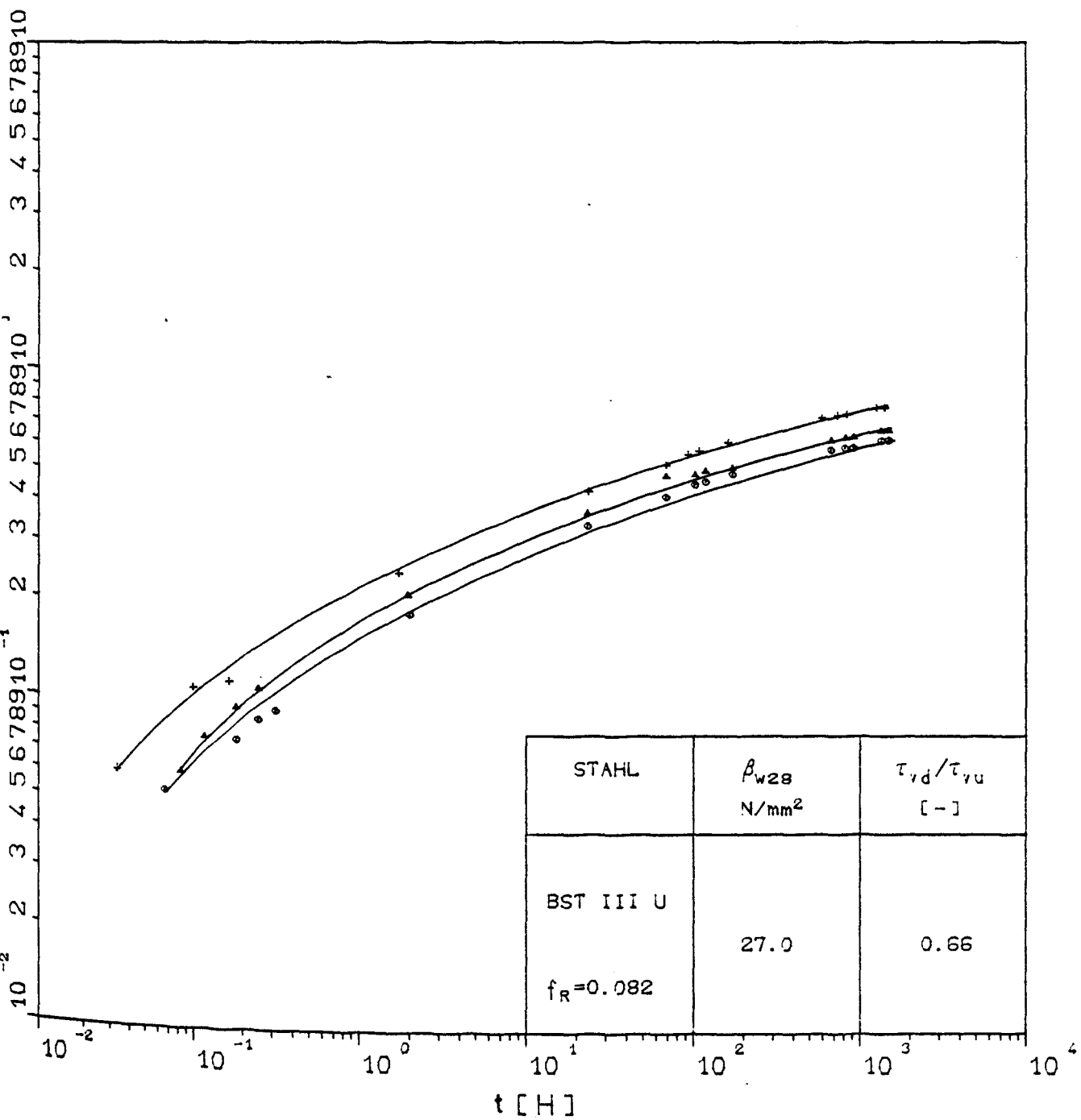
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche
AKZ13.06, AKZ13.09 und AKZ13.20



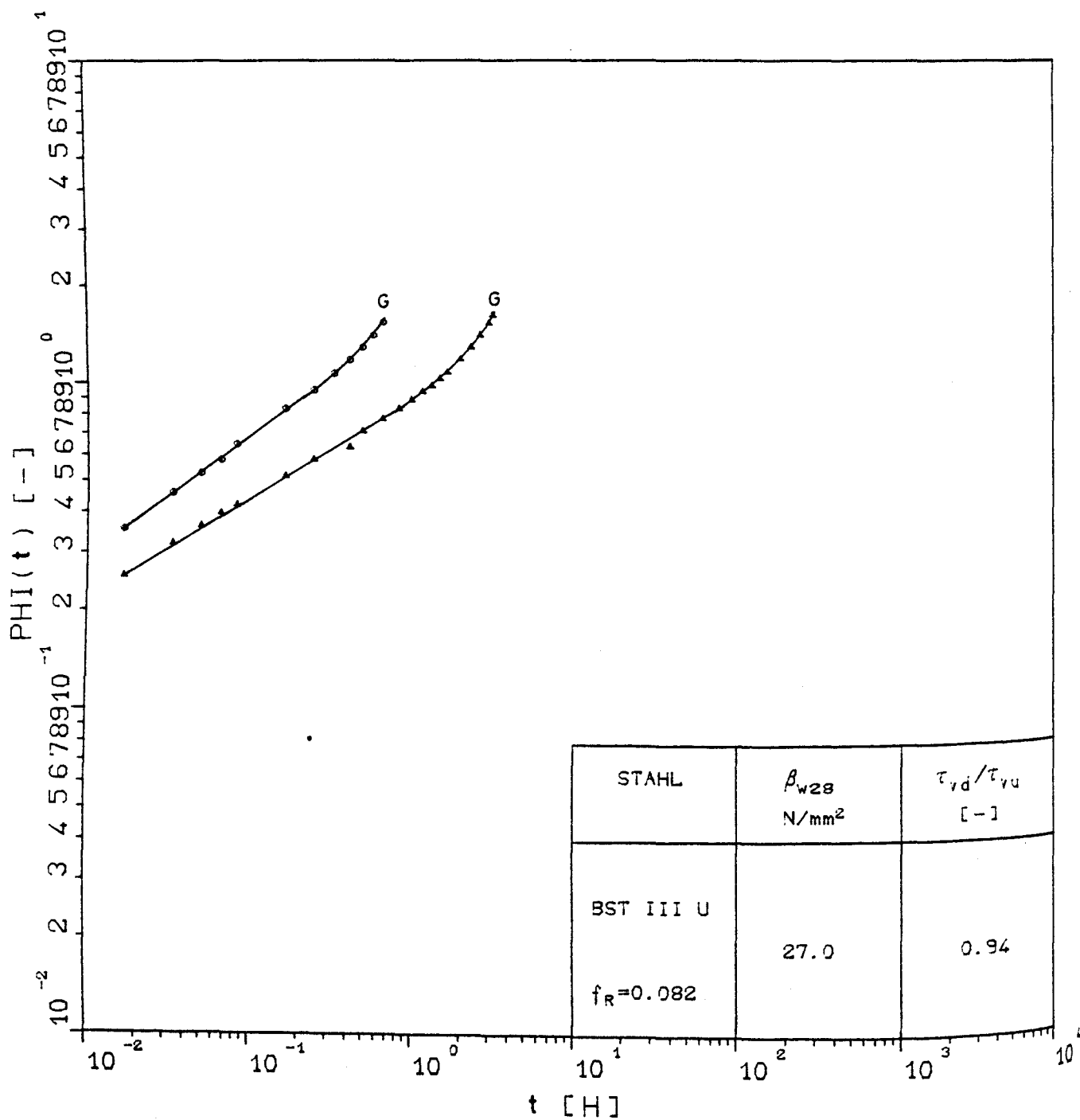
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKZ13.01 und AKZ13.13



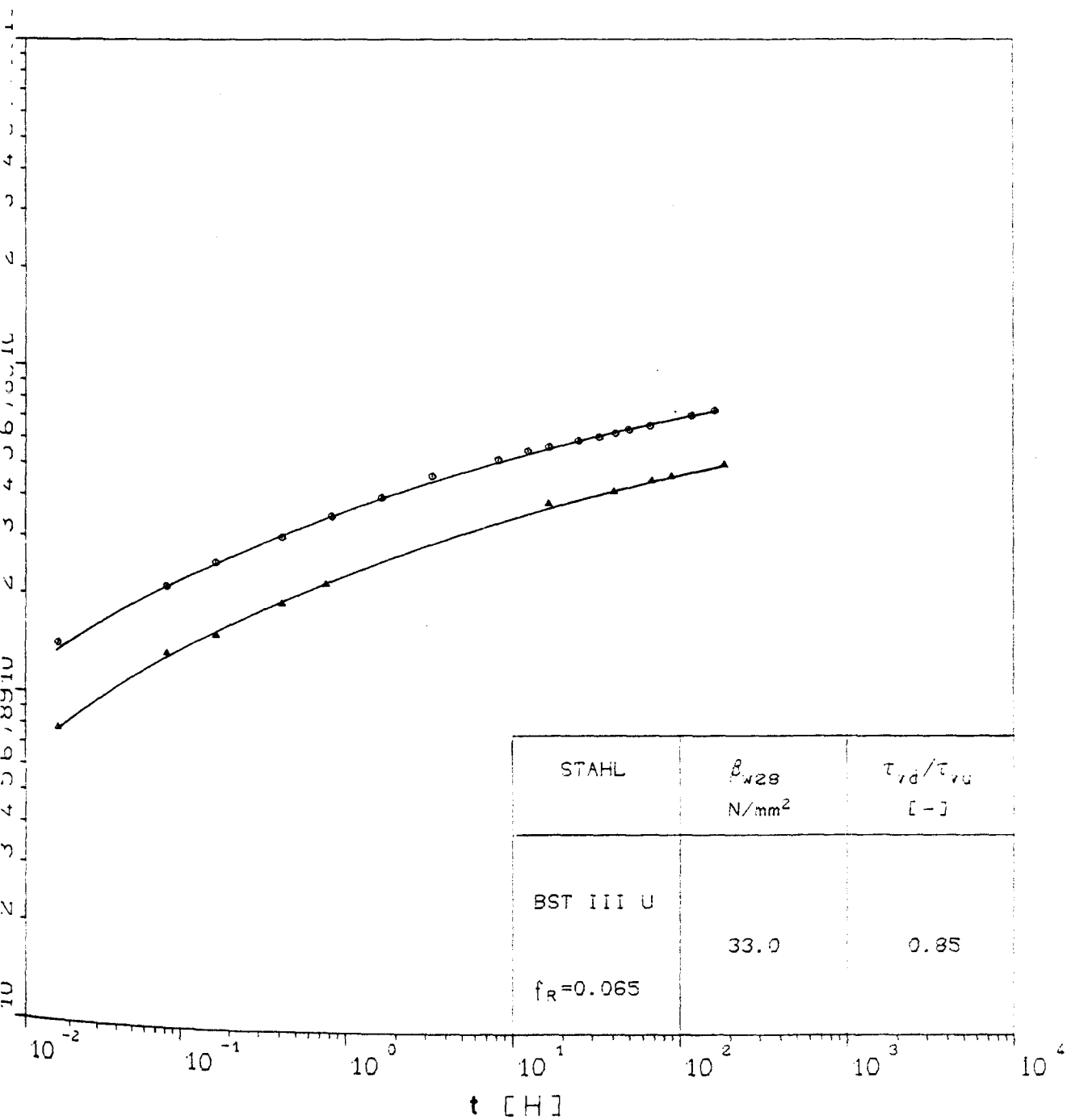
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche
AKZ15.15, AKZ15.16 und AKZ15.19



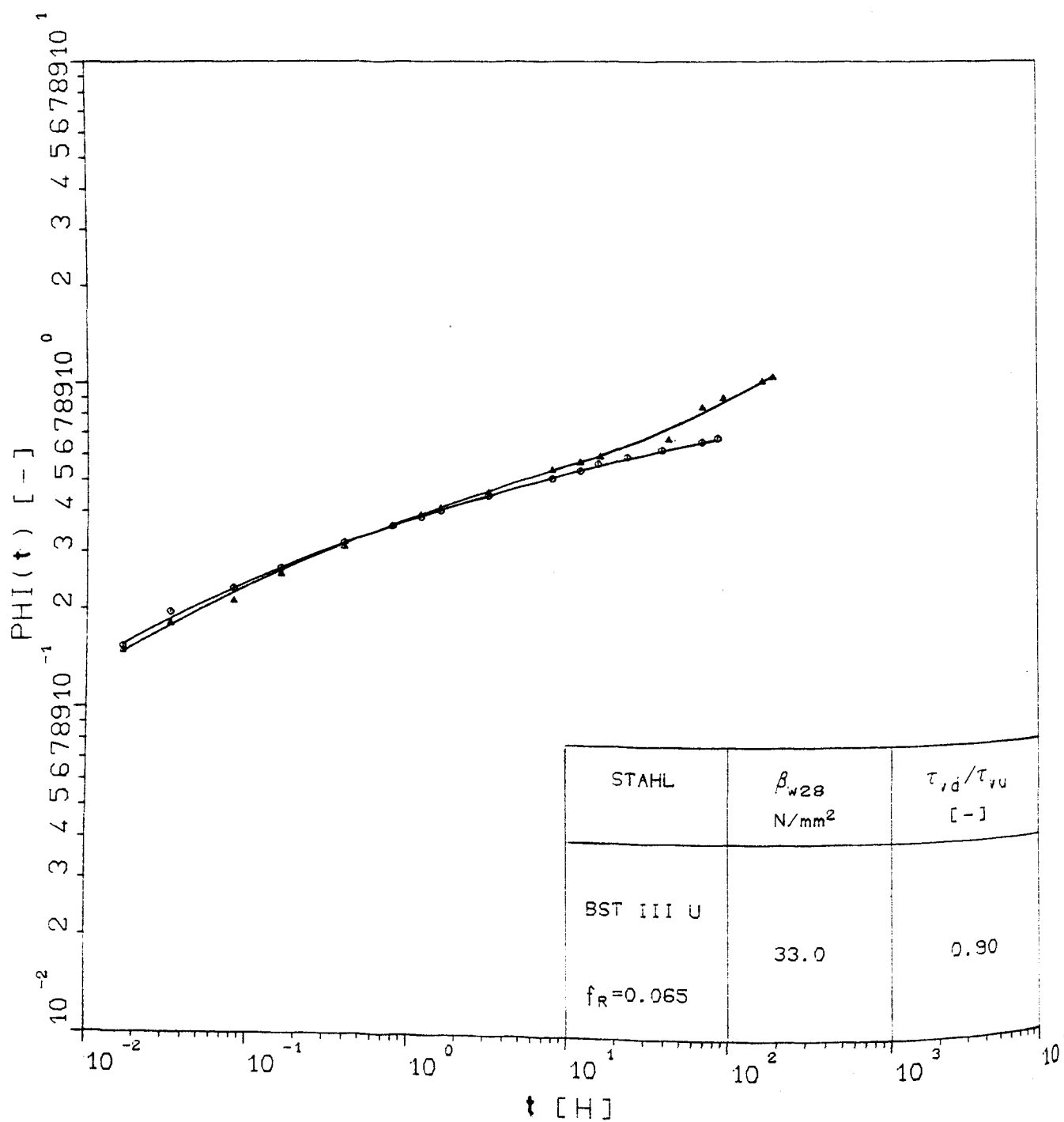
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKZ15.04, AKZ15.07 und AKZ15.08



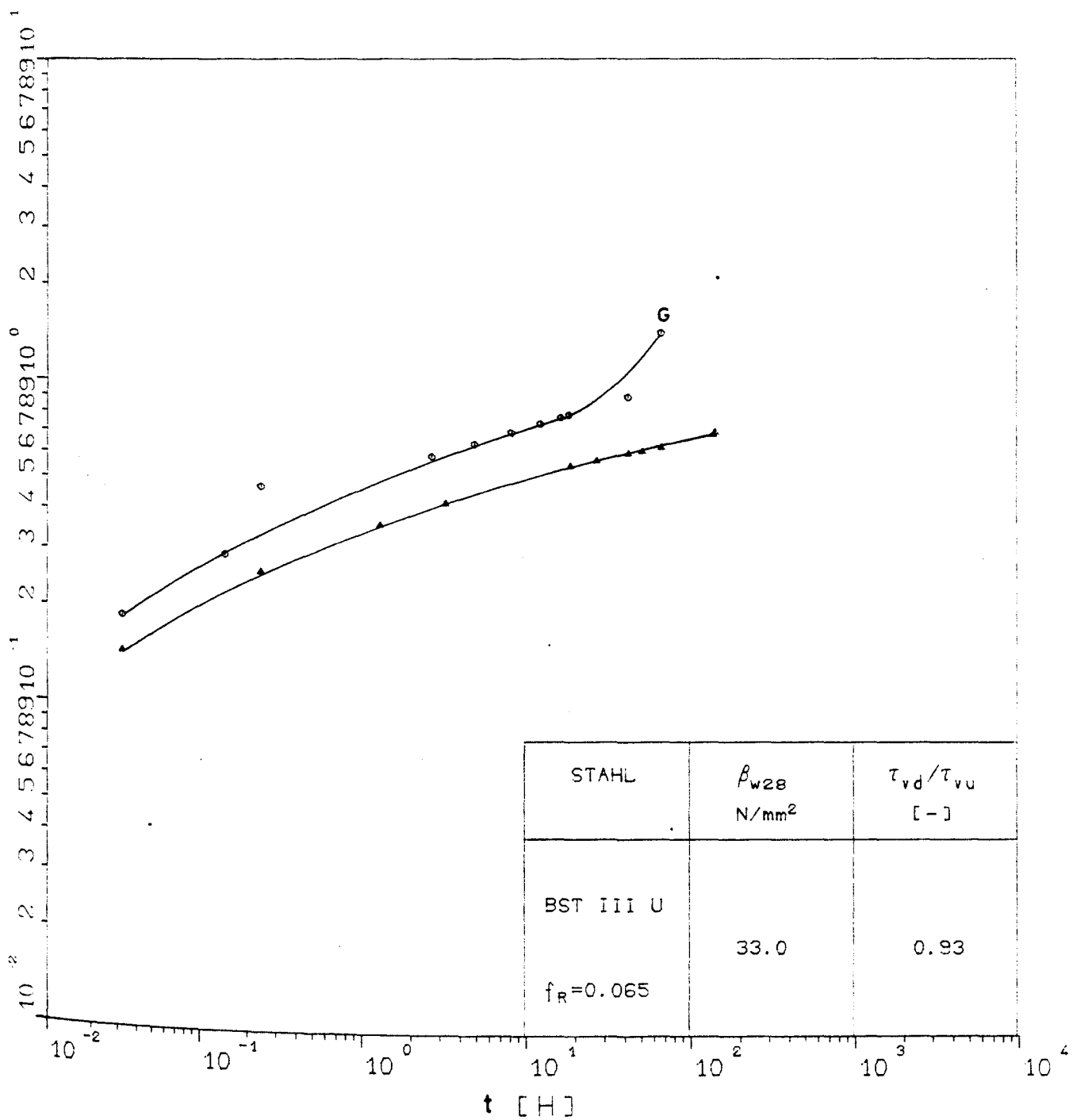
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKZ15.02 und AKZ15.05



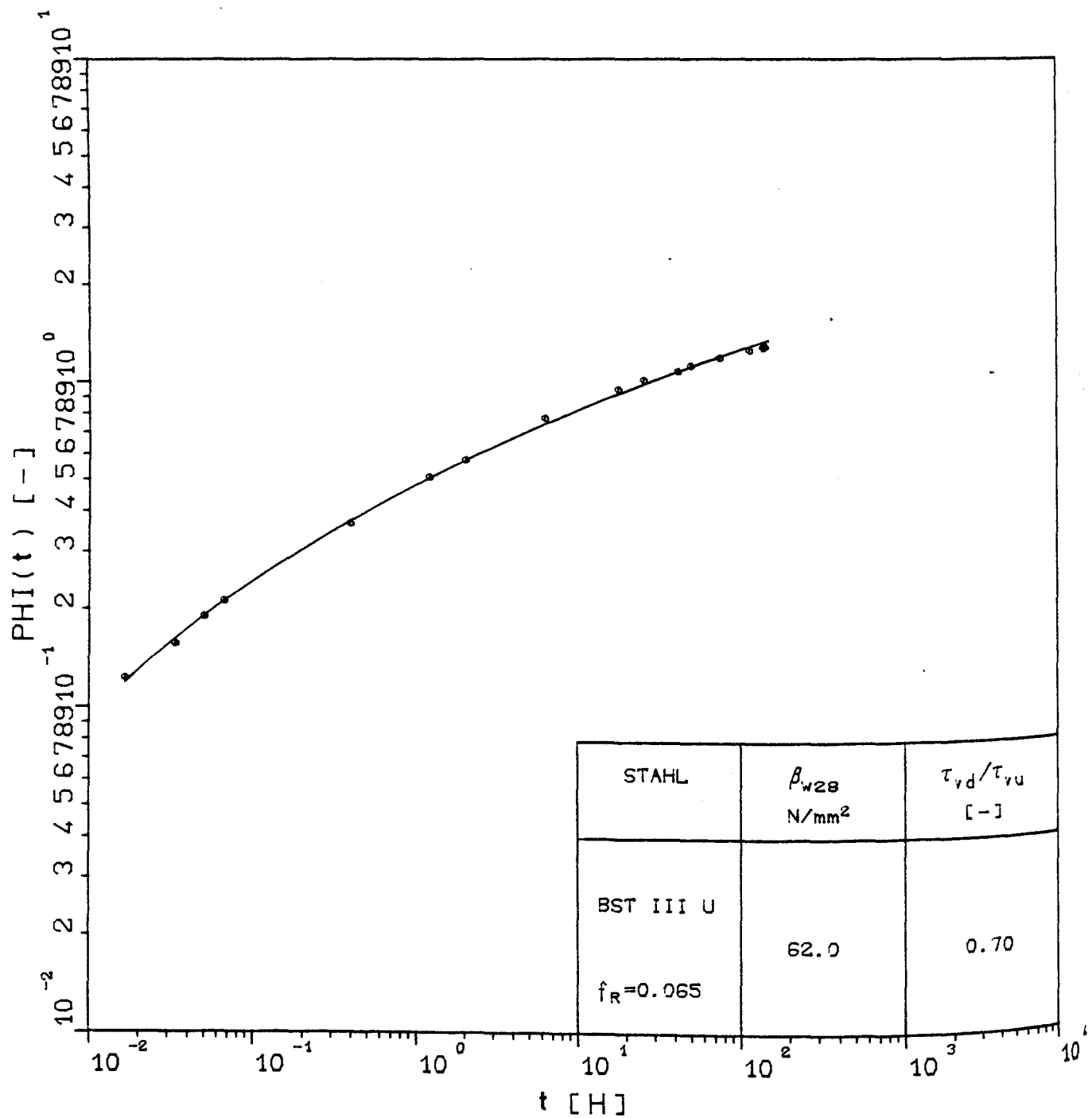
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKZ18.02 und AKZ18.17



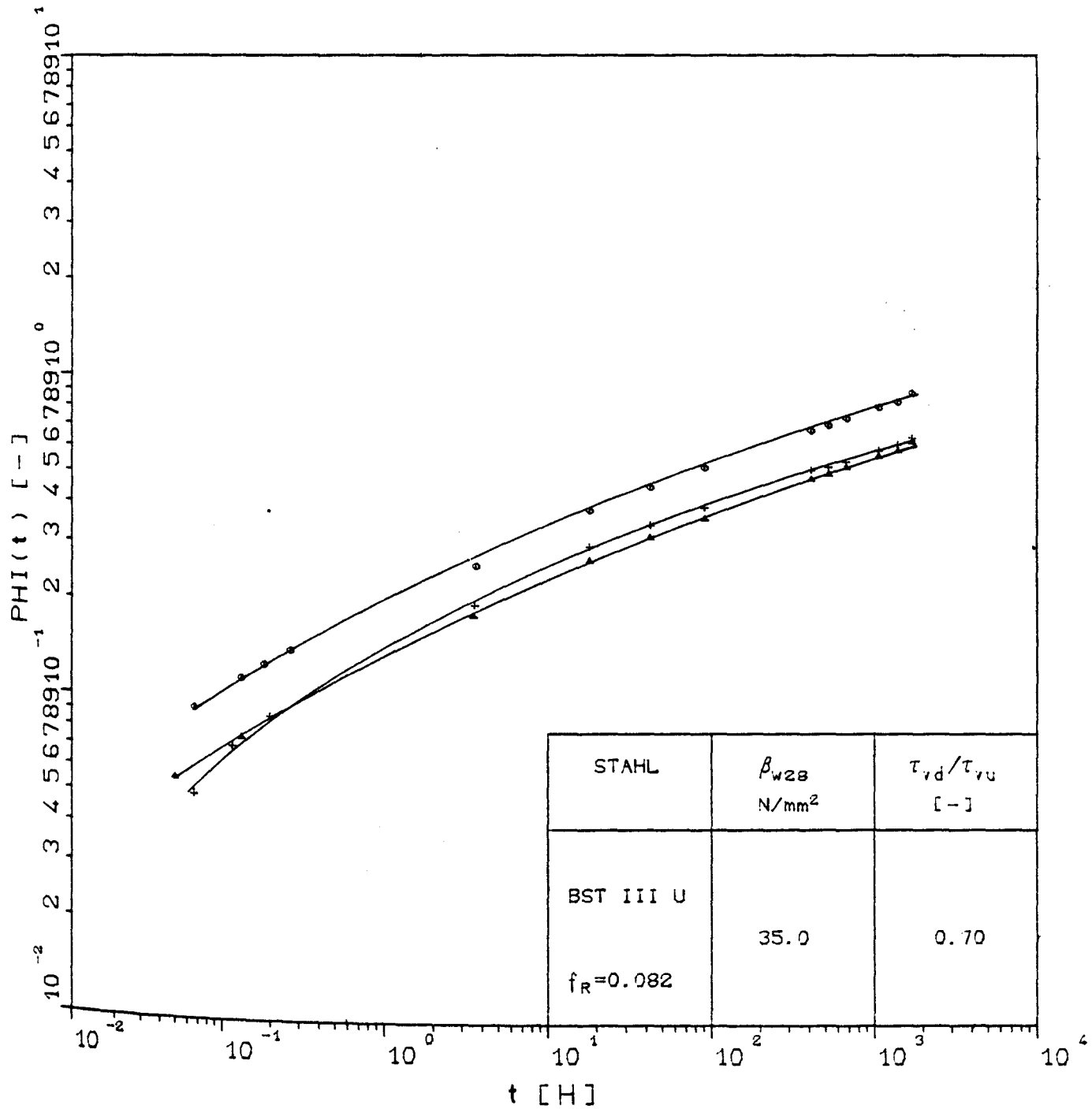
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche
AKZ18.06 und AKZ18.15



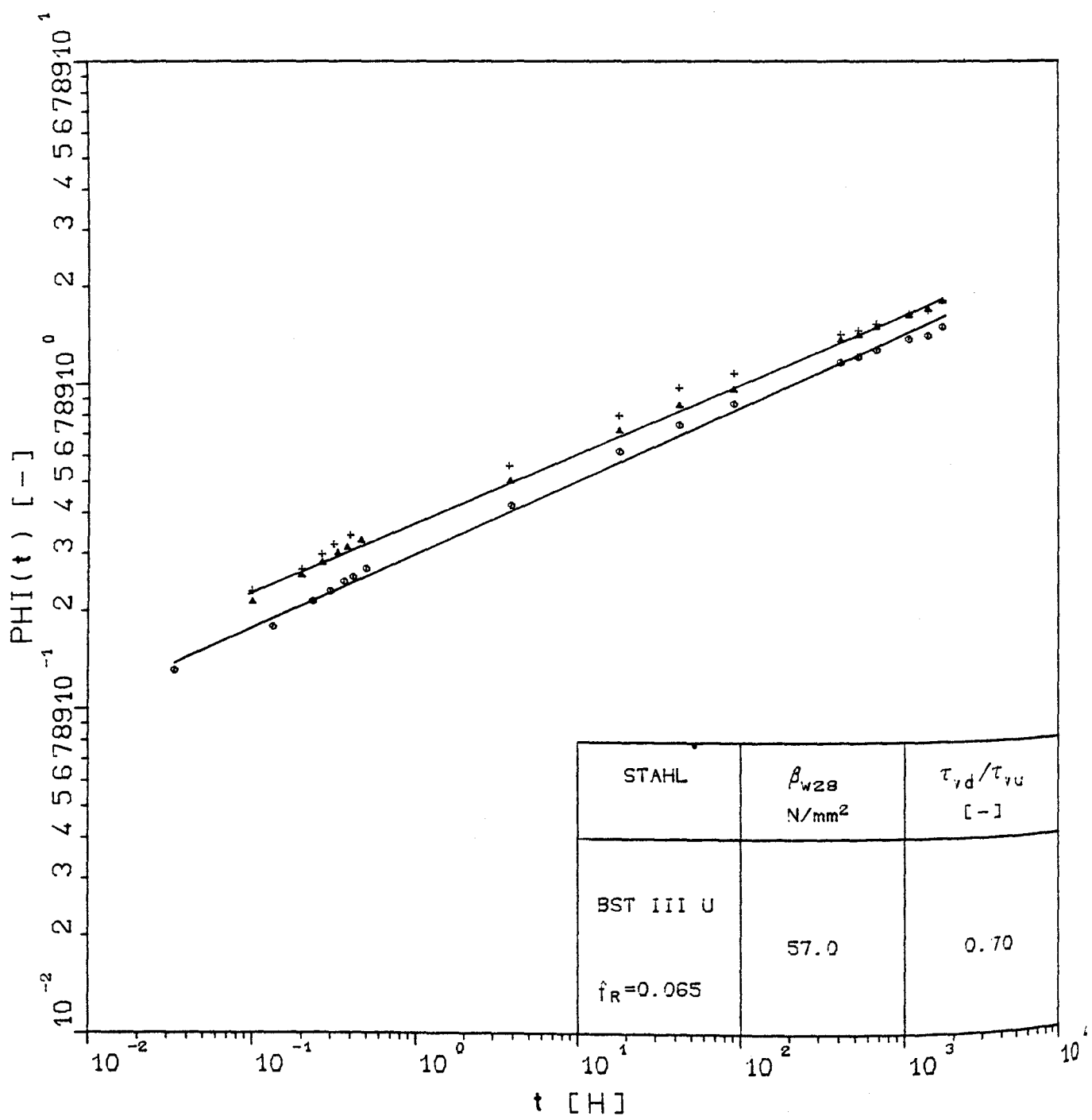
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKZ18.04 und AKZ18.18



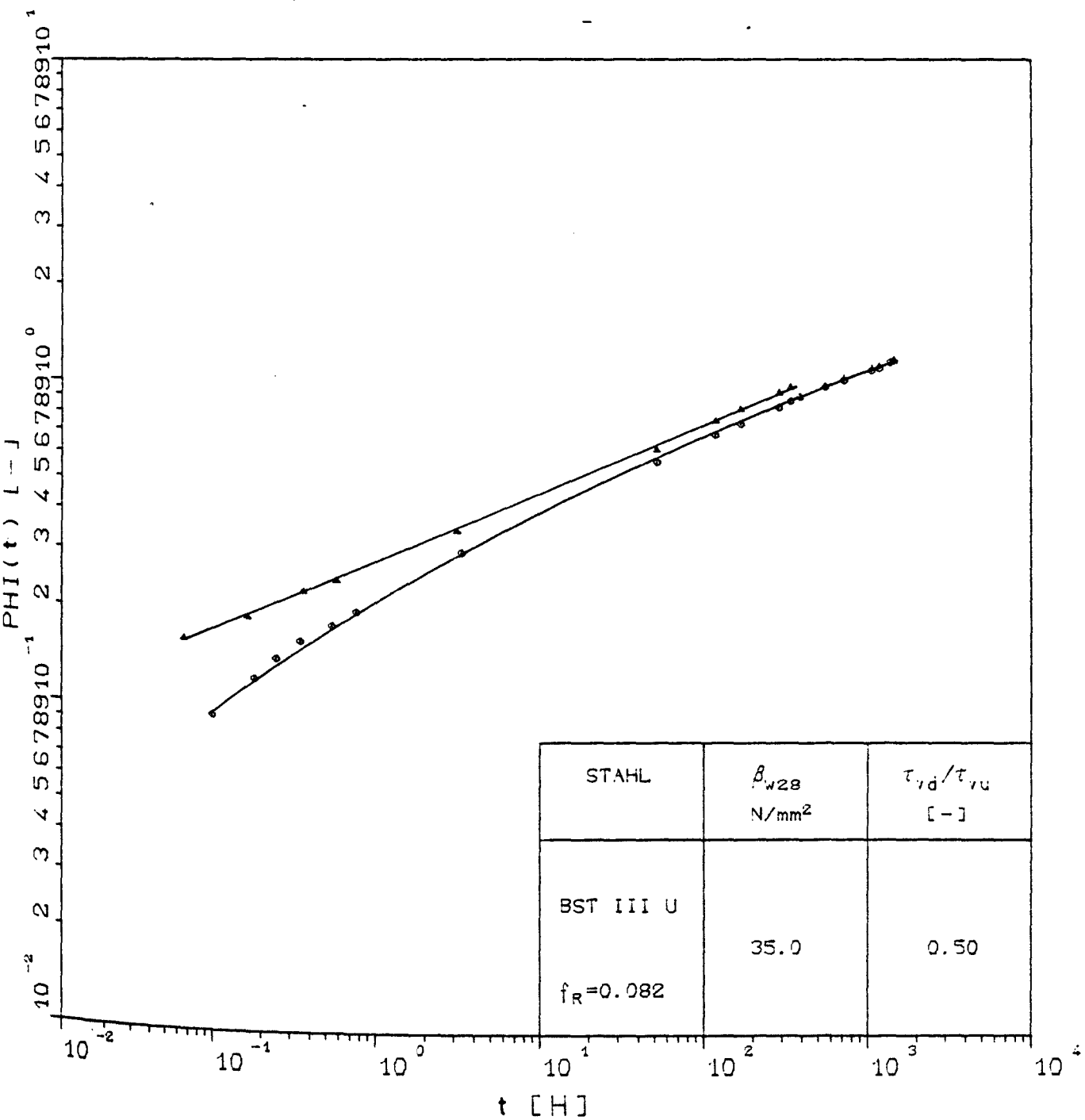
Kriechzahl in Abhängigkeit von der Zeit t für den Dauerstandversuch AKZ19.09



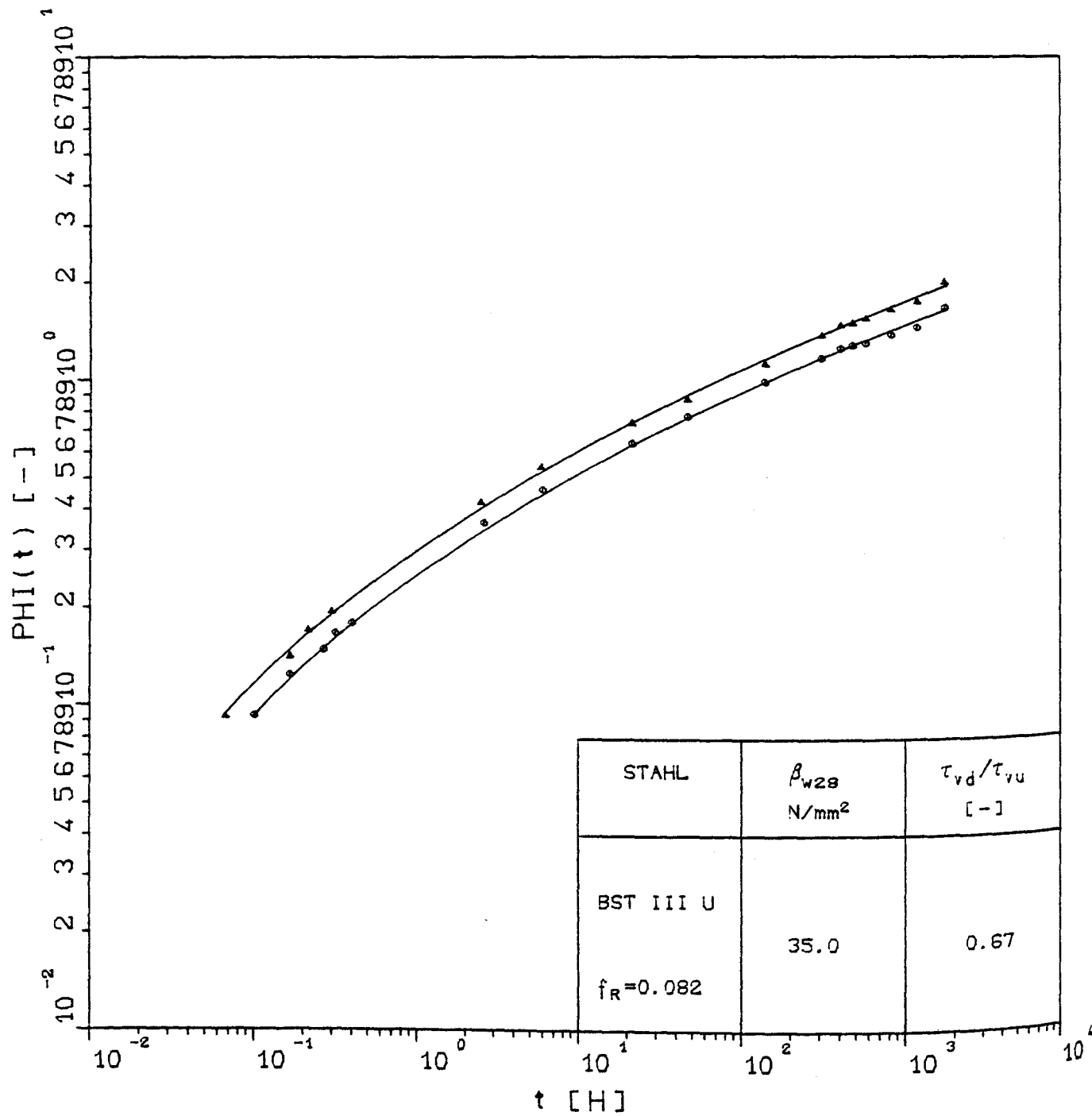
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKZ20.01, AKZ20.03 und AKZ20.20



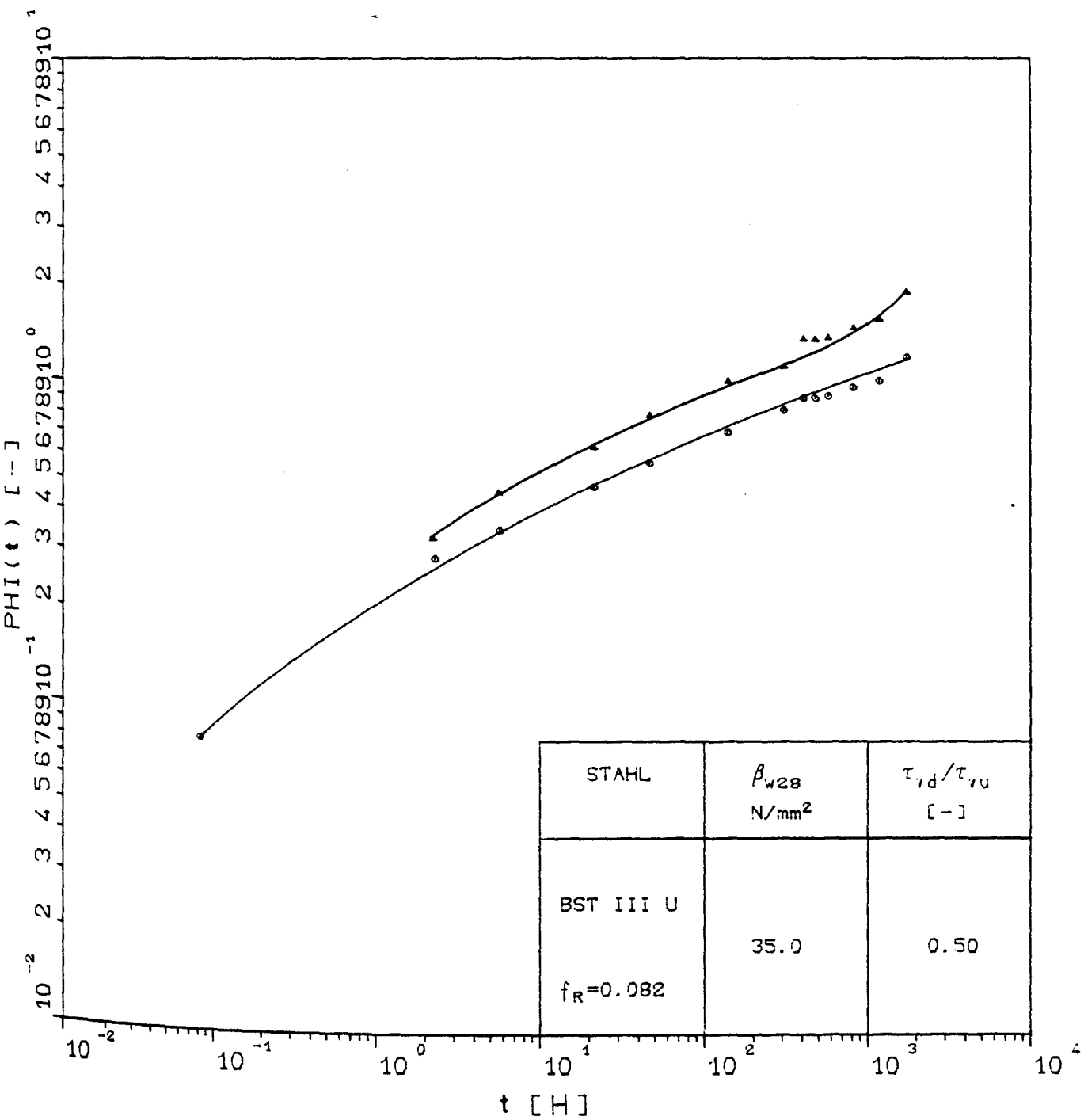
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKZ21.09, AKZ21.13 und AKZ21.14



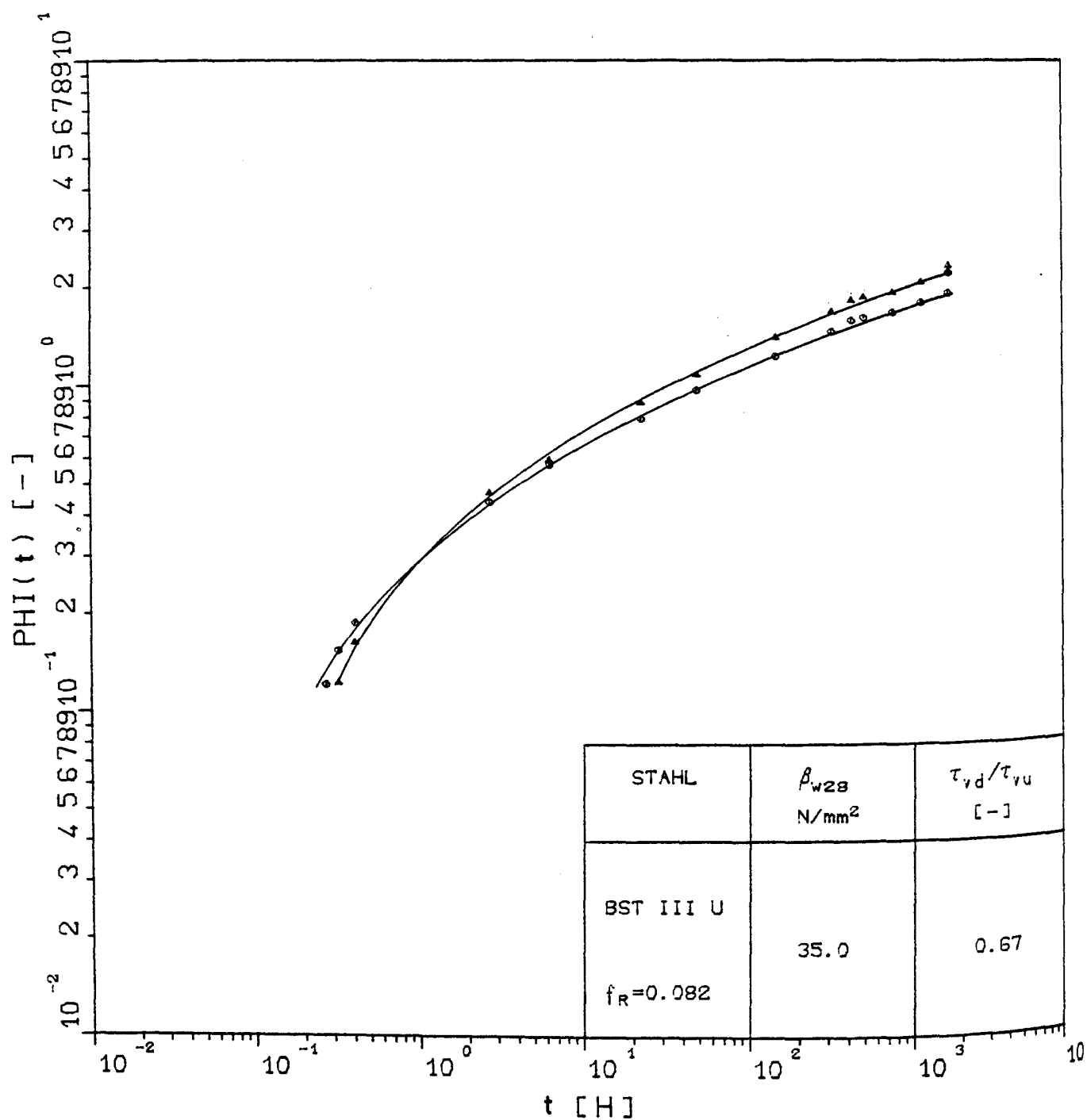
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKE1.02 und AKE1.05, zentrisch



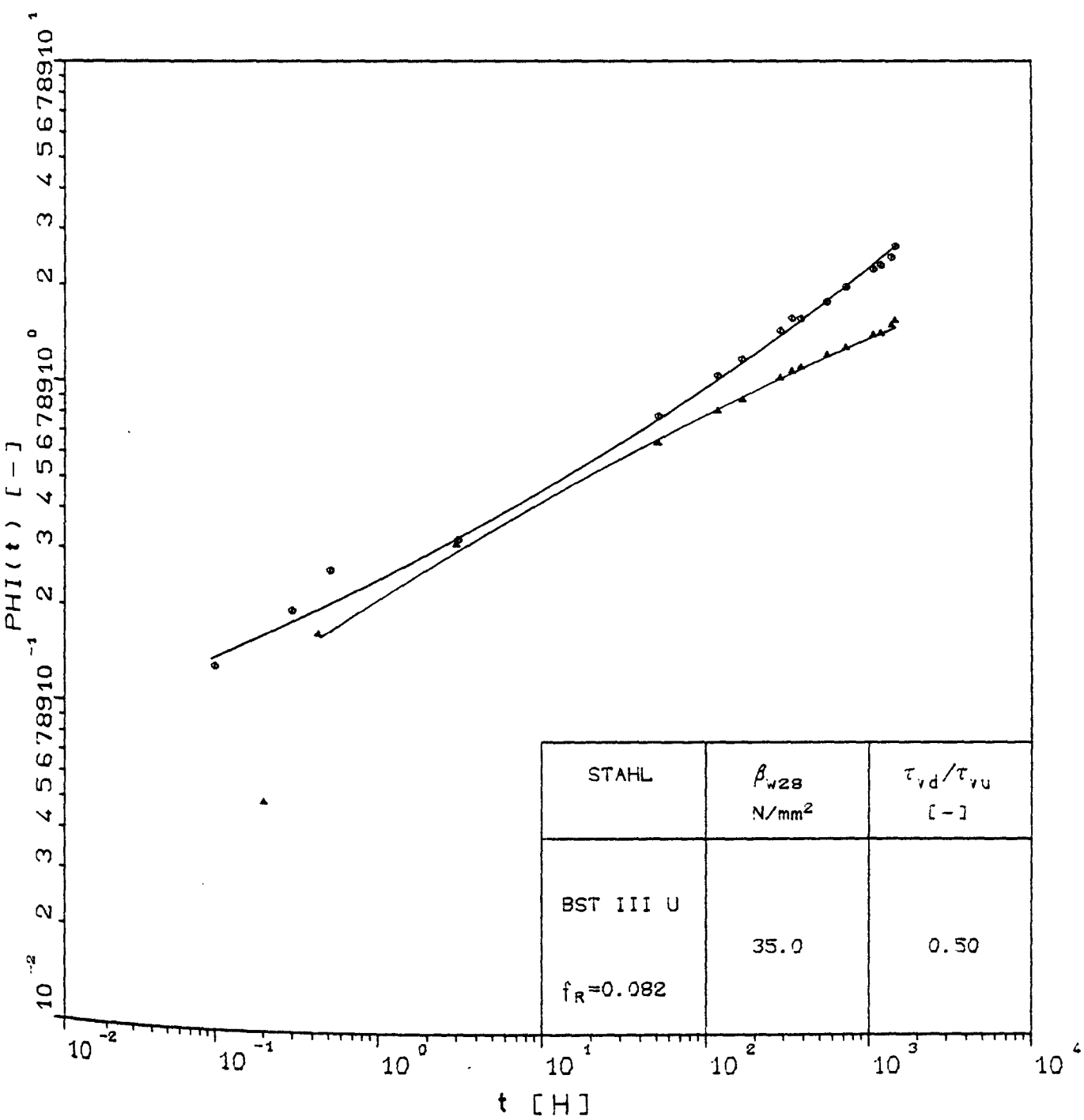
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKE1.01 und AKE1.06, zentrisch



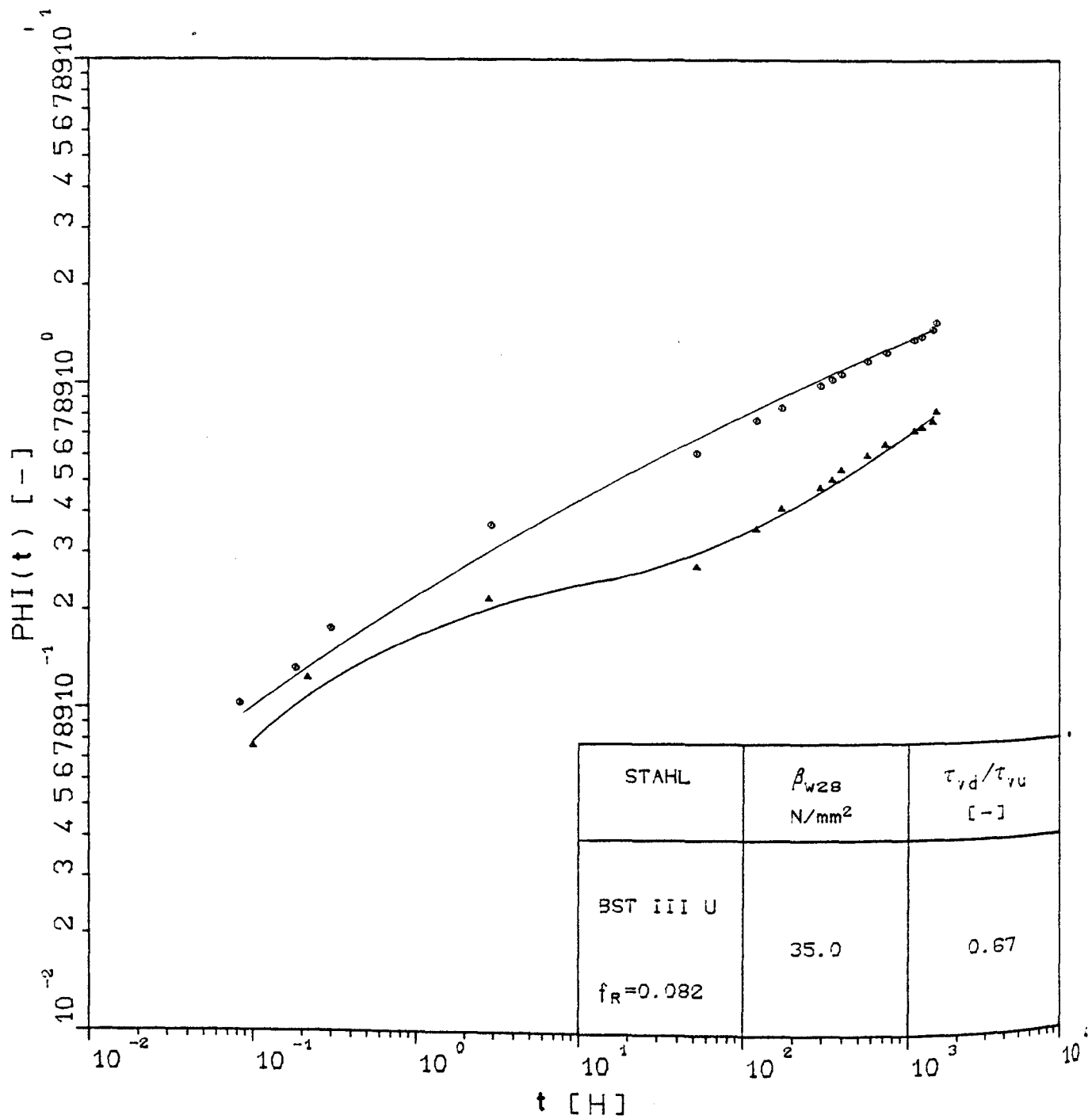
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche
AKE1.07 und AKE1.06, Randlage 2 ds



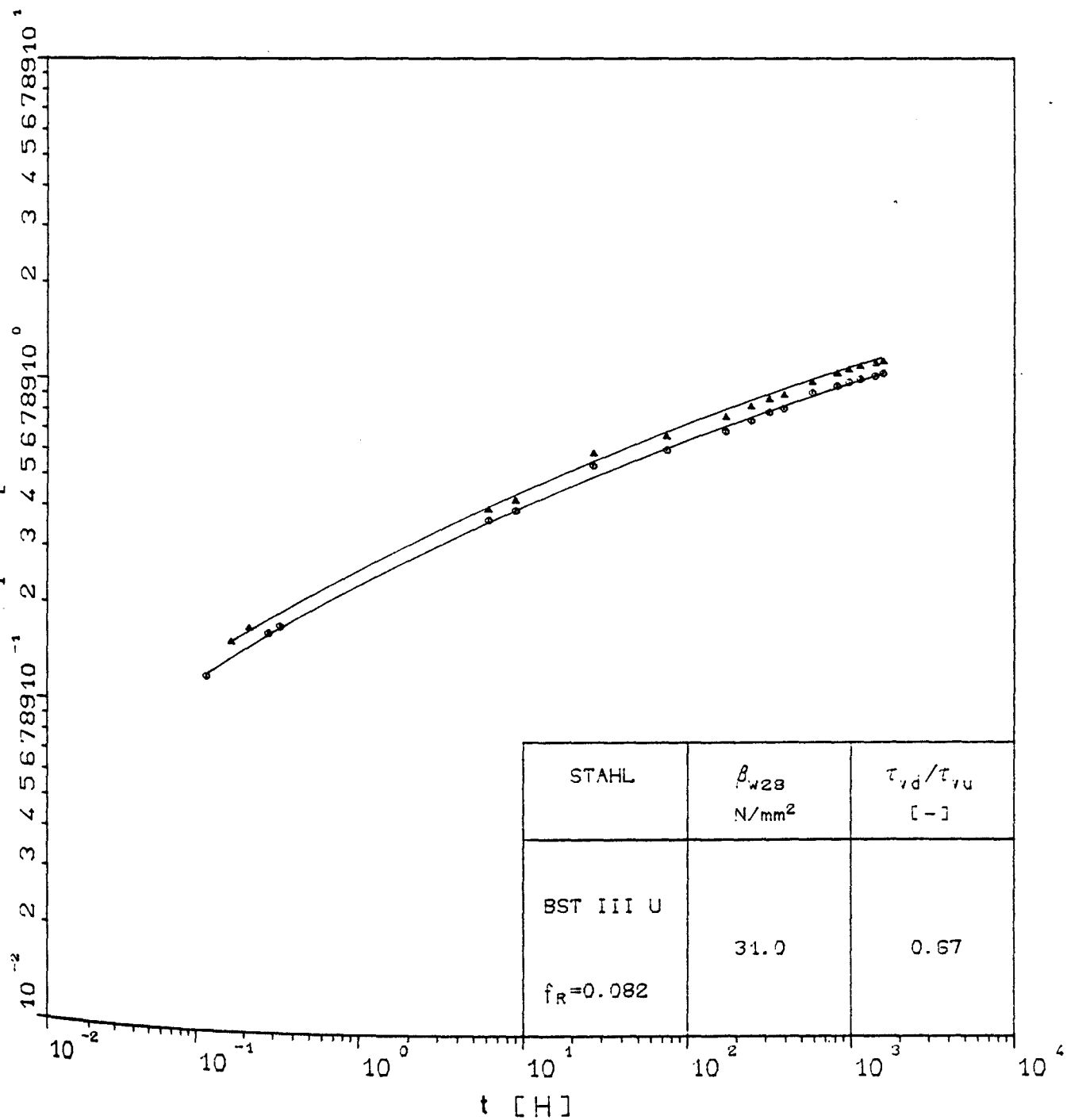
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKE1.04 und AKE1.05, Randlage 2 ds



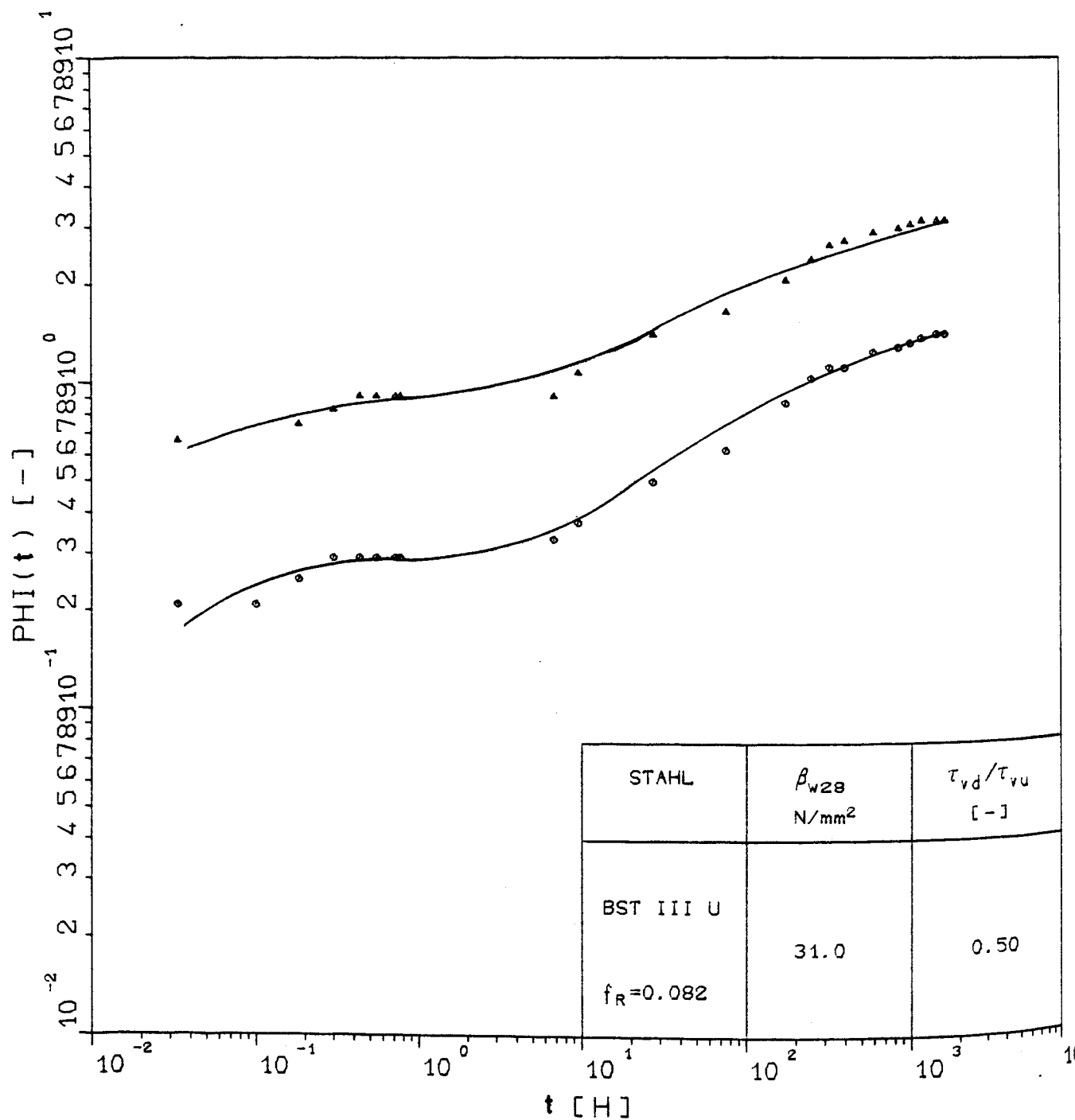
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKE1.02 und AKE1.04, Randlage 1 ds



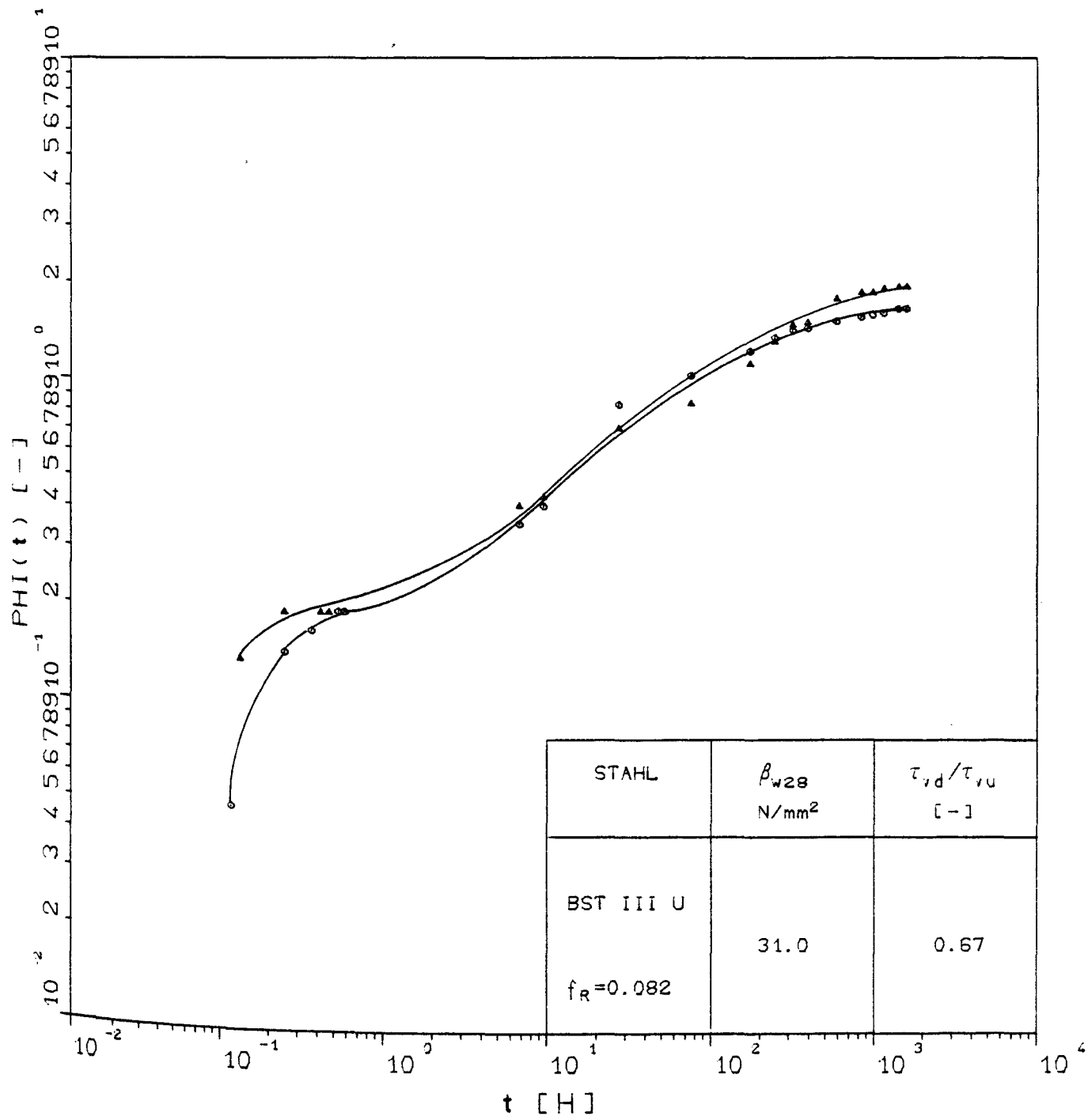
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKE1.06 und AKE1.07, Randlage 1 ds



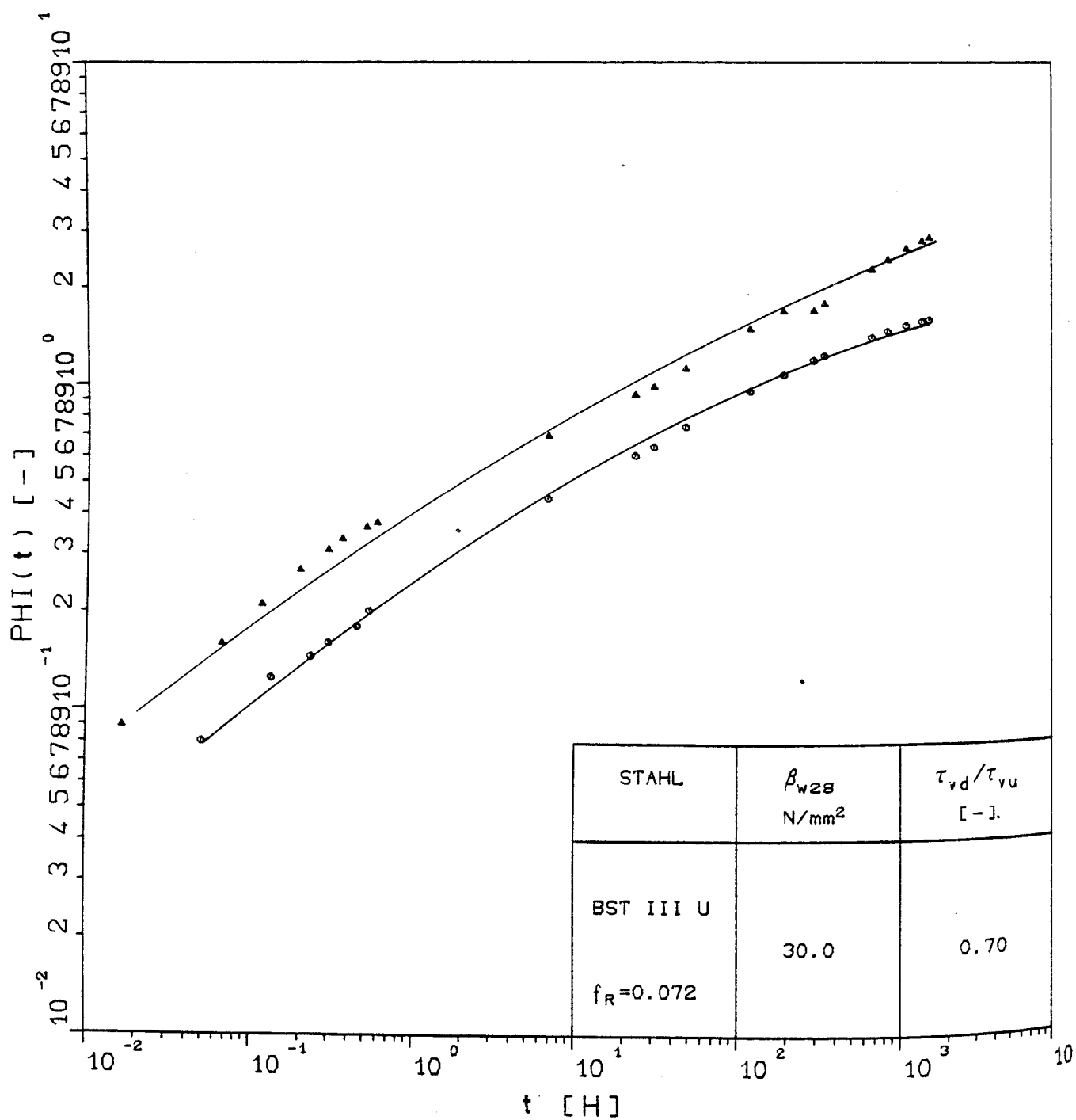
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKE2.03 und AKE2.06, zentrisch



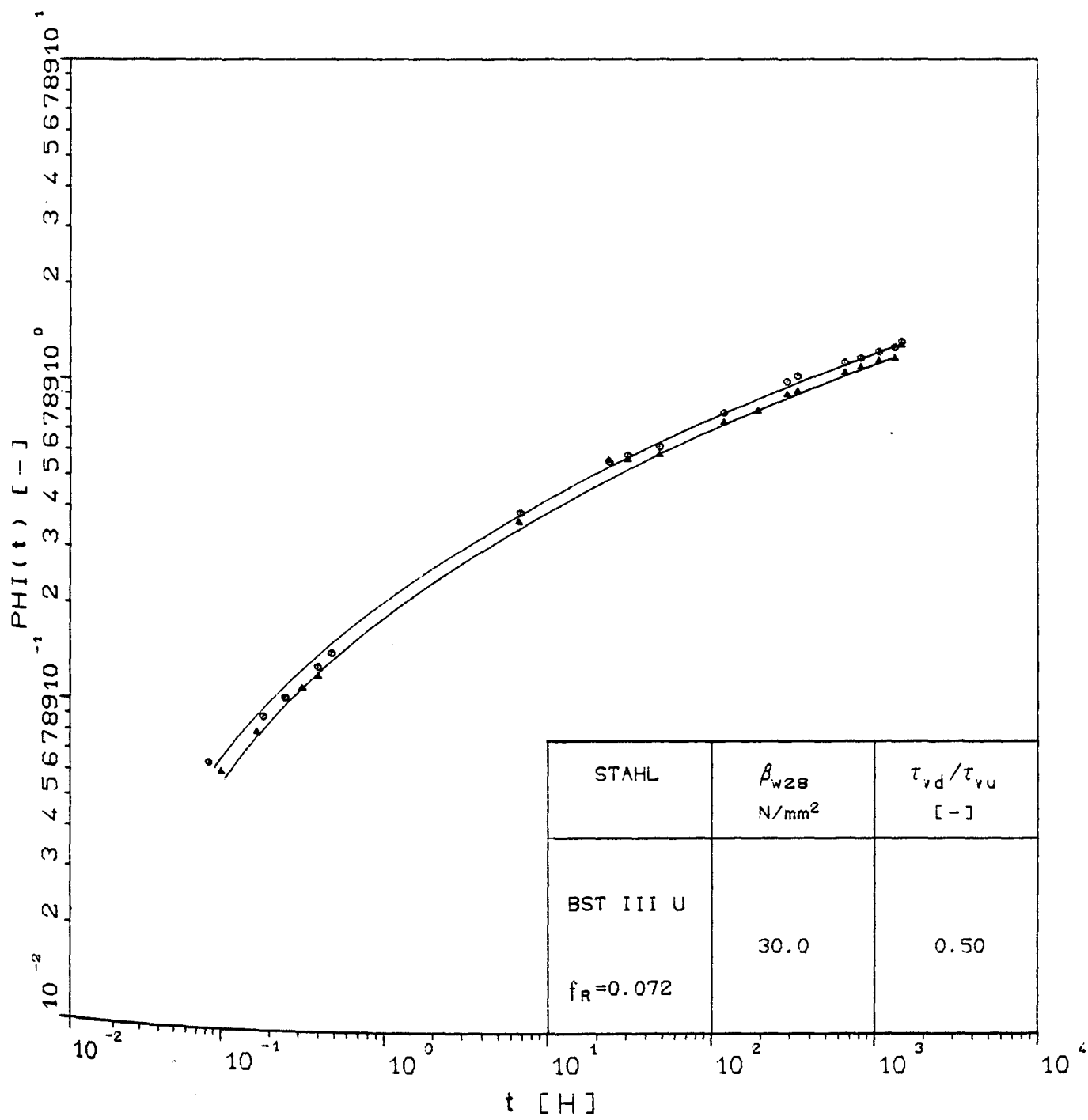
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKE2.05 und AKE2.01, Ecklage 2 ds



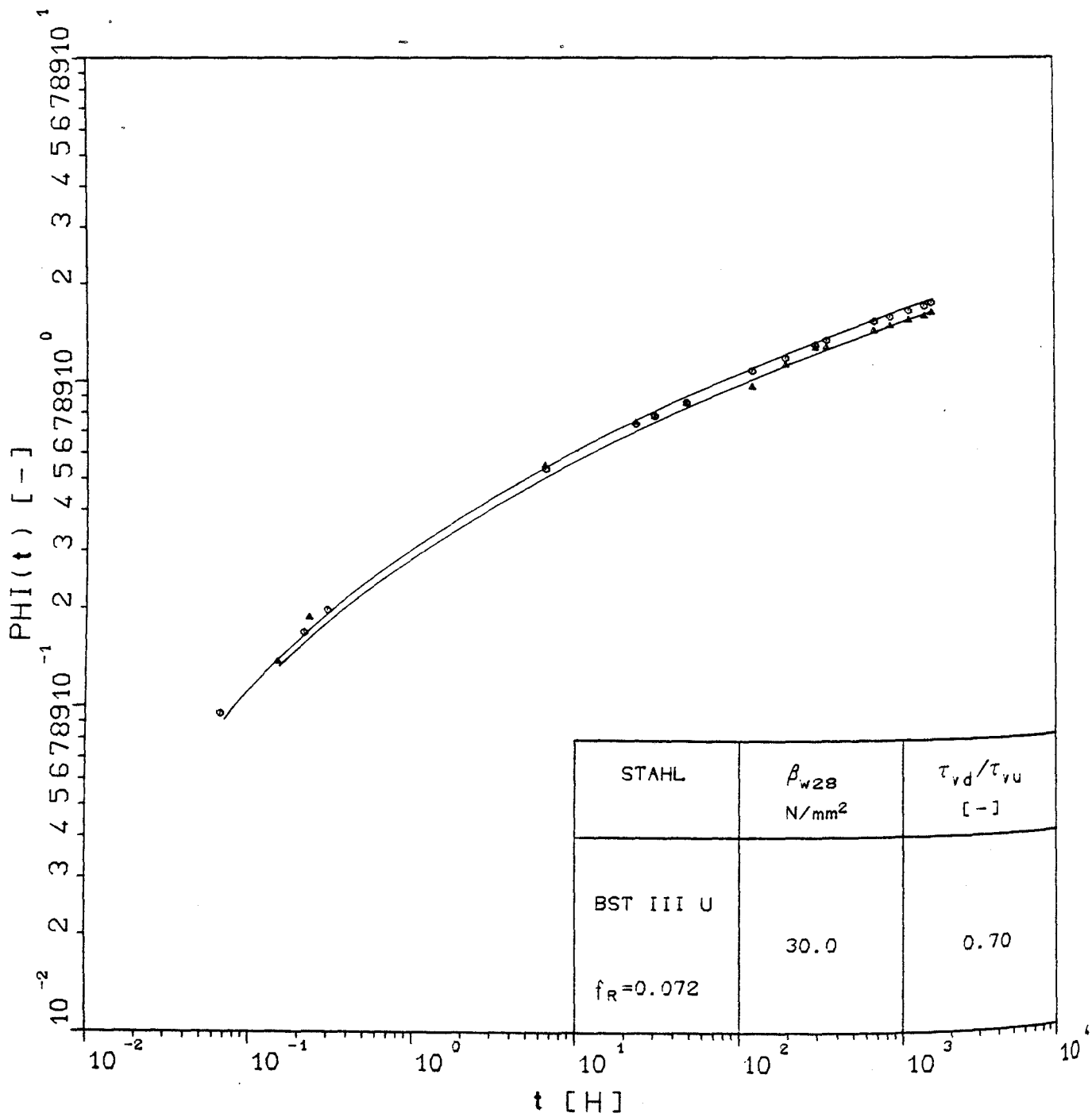
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKE2.03 und AKE2.07, Ecklage 2 ds



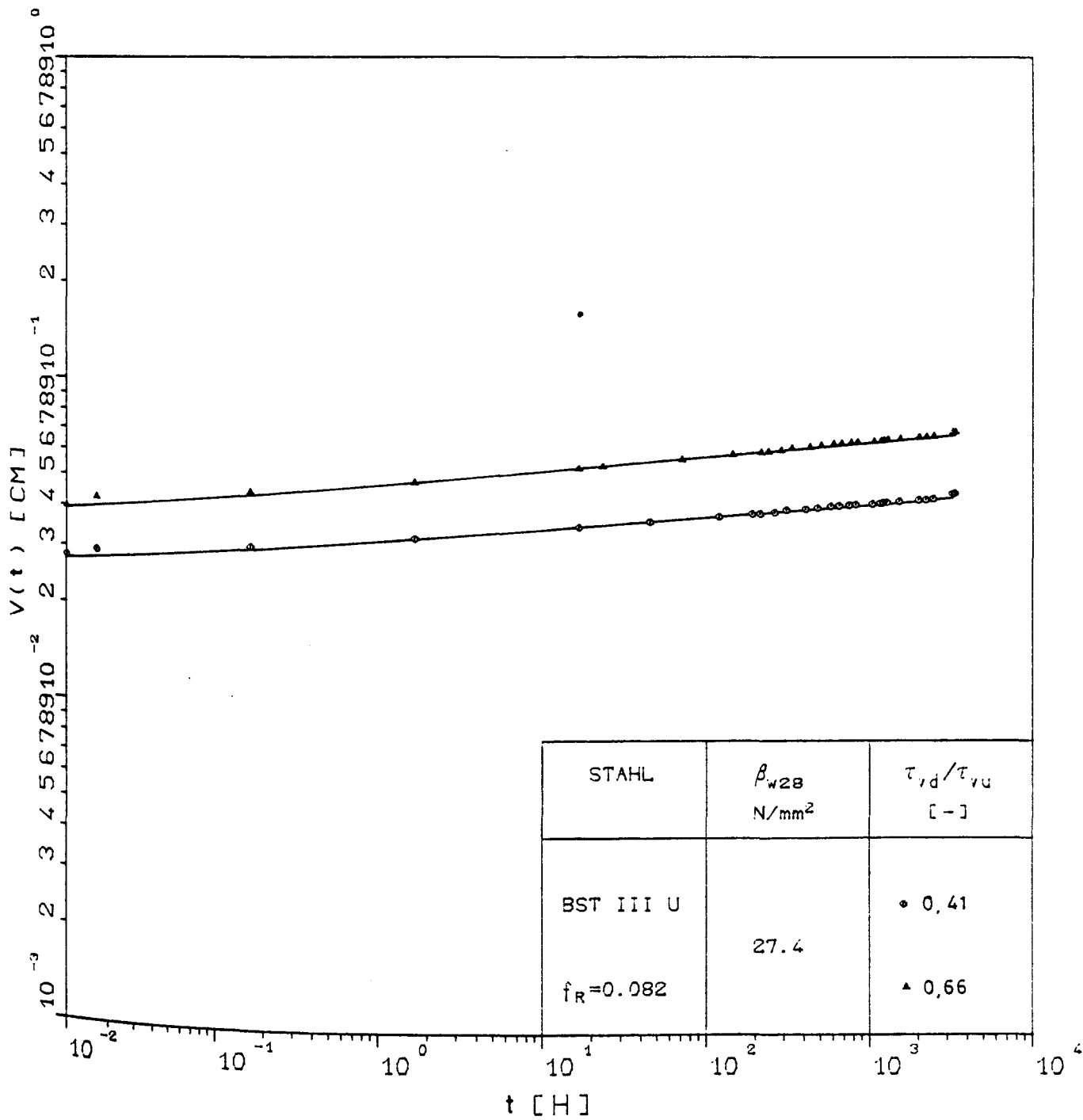
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKE4.25 und AKE4.26, Randlage 1 ds



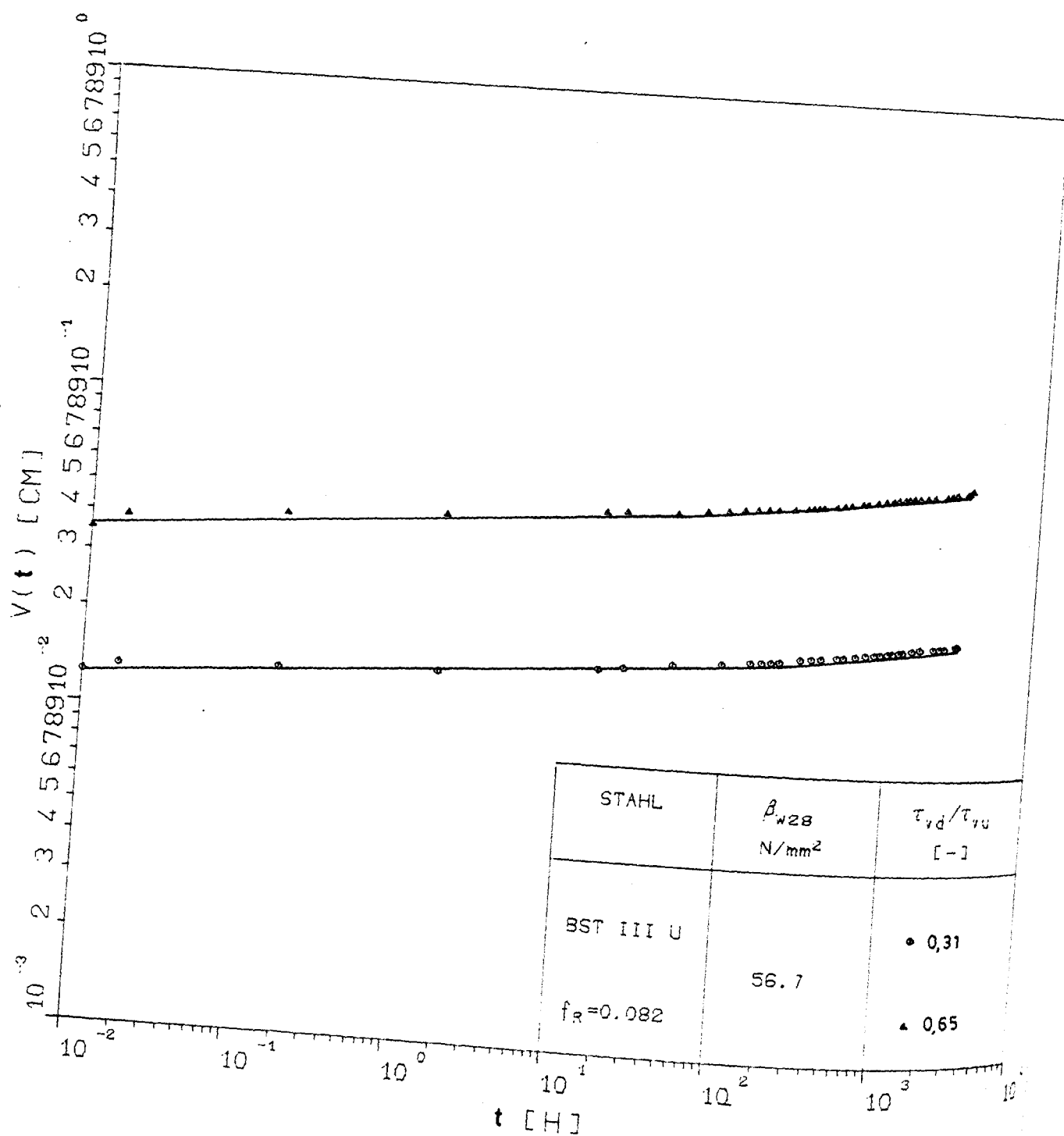
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKE4.17 und AKE4.20, Randlage 2 ds



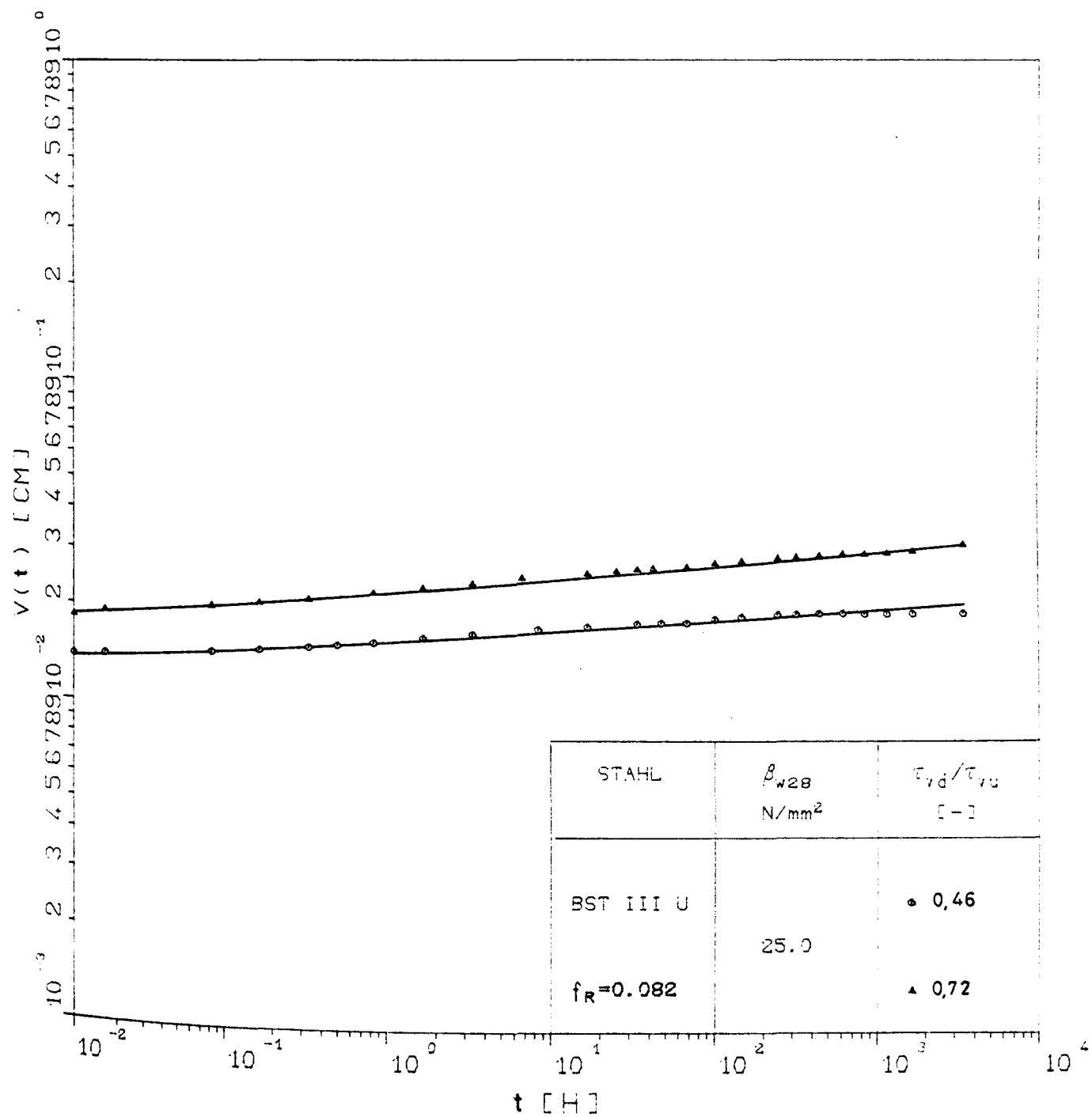
Kriechzahlen in Abhängigkeit von der Zeit t für die Dauerstandversuche AKE4.19 und AKE4.21, Randlage 1 ds



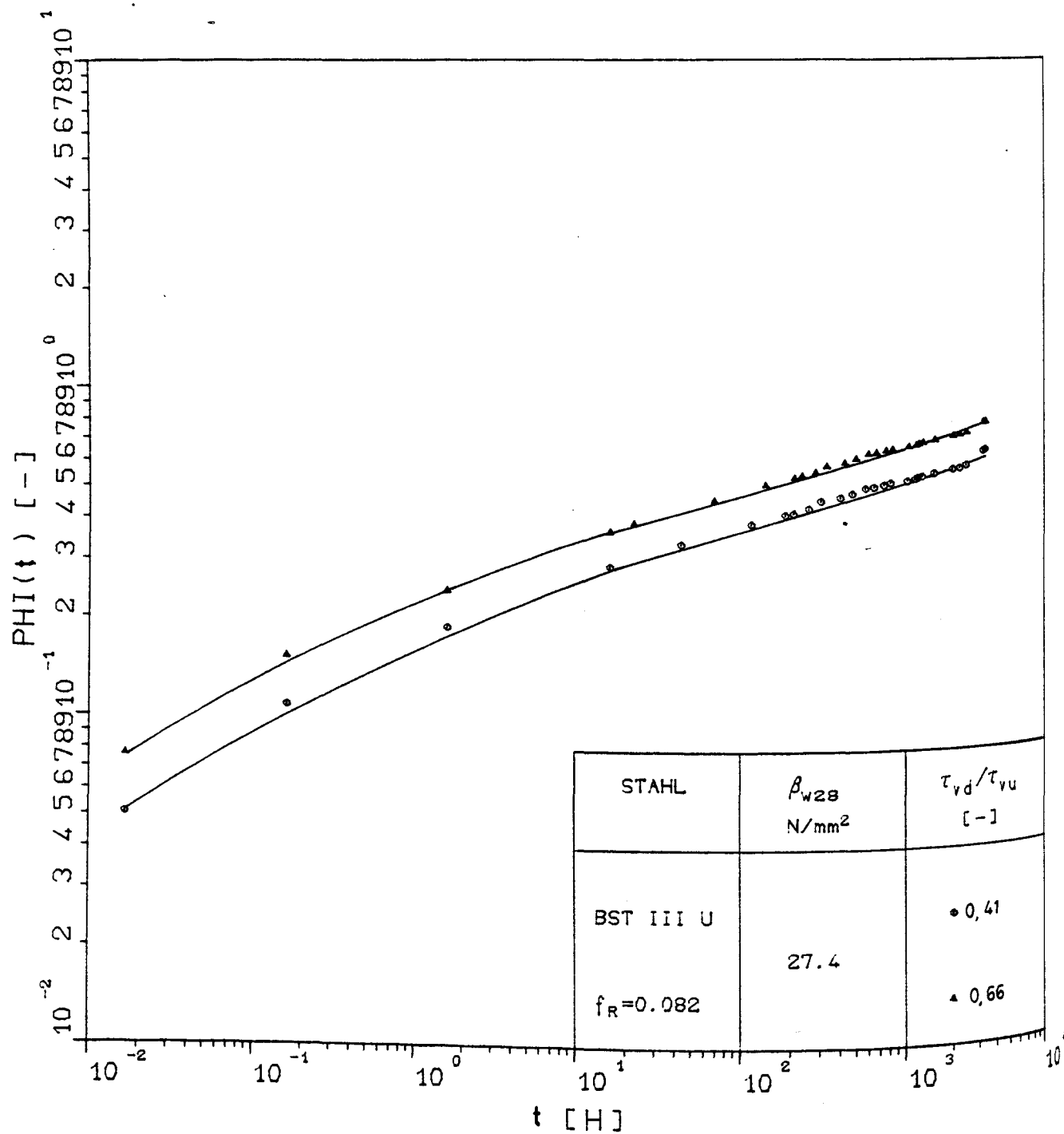
Einfluß des Lastniveaus auf die zeitabhängige Verschiebungszunahme unter konstanter Dauerbeanspruchung (Versuche AKZ2.16 und AKZ2.04)



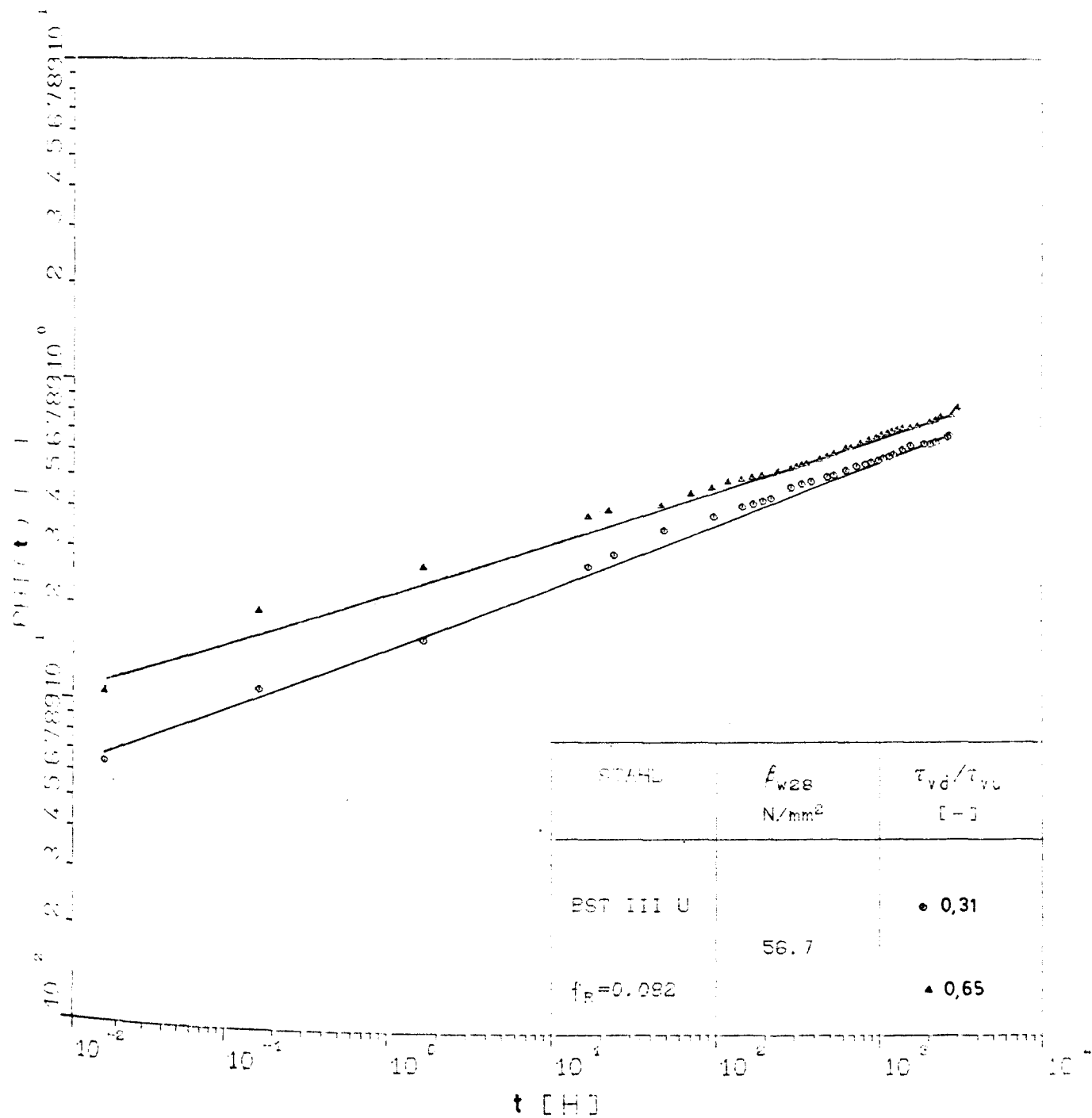
Einfluß des Lastniveaus auf die zeitabhängige Verschiebungszunahme unter konstanter Dauerbeanspruchung (AKZ4.01 und AKZ4.08)



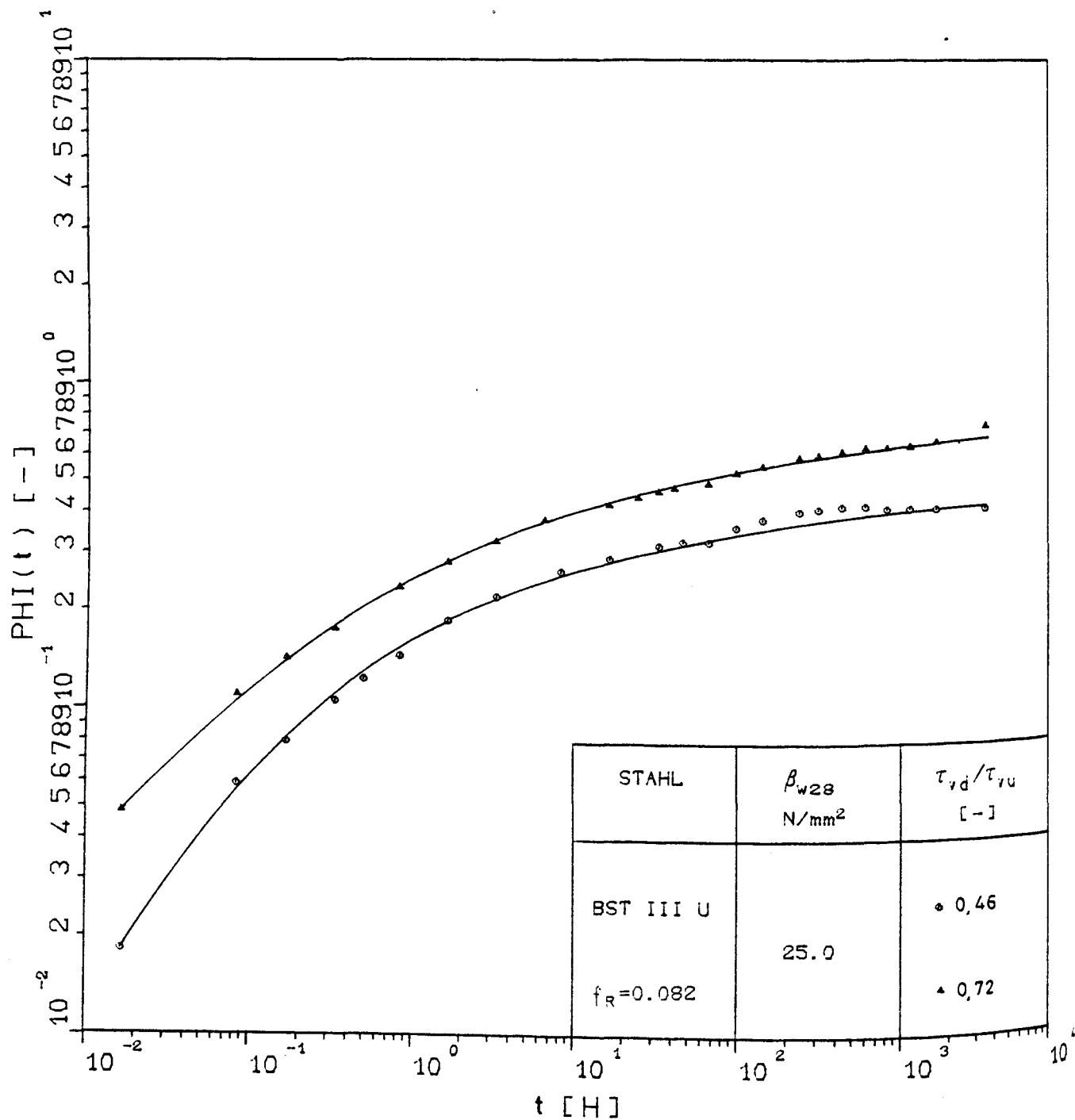
Einfluß des Lastniveaus auf die zeitabhängige Verschiebungszunahme unter konstanter Dauerbeanspruchung (Versuche AKZ6.04 und AKZ06)



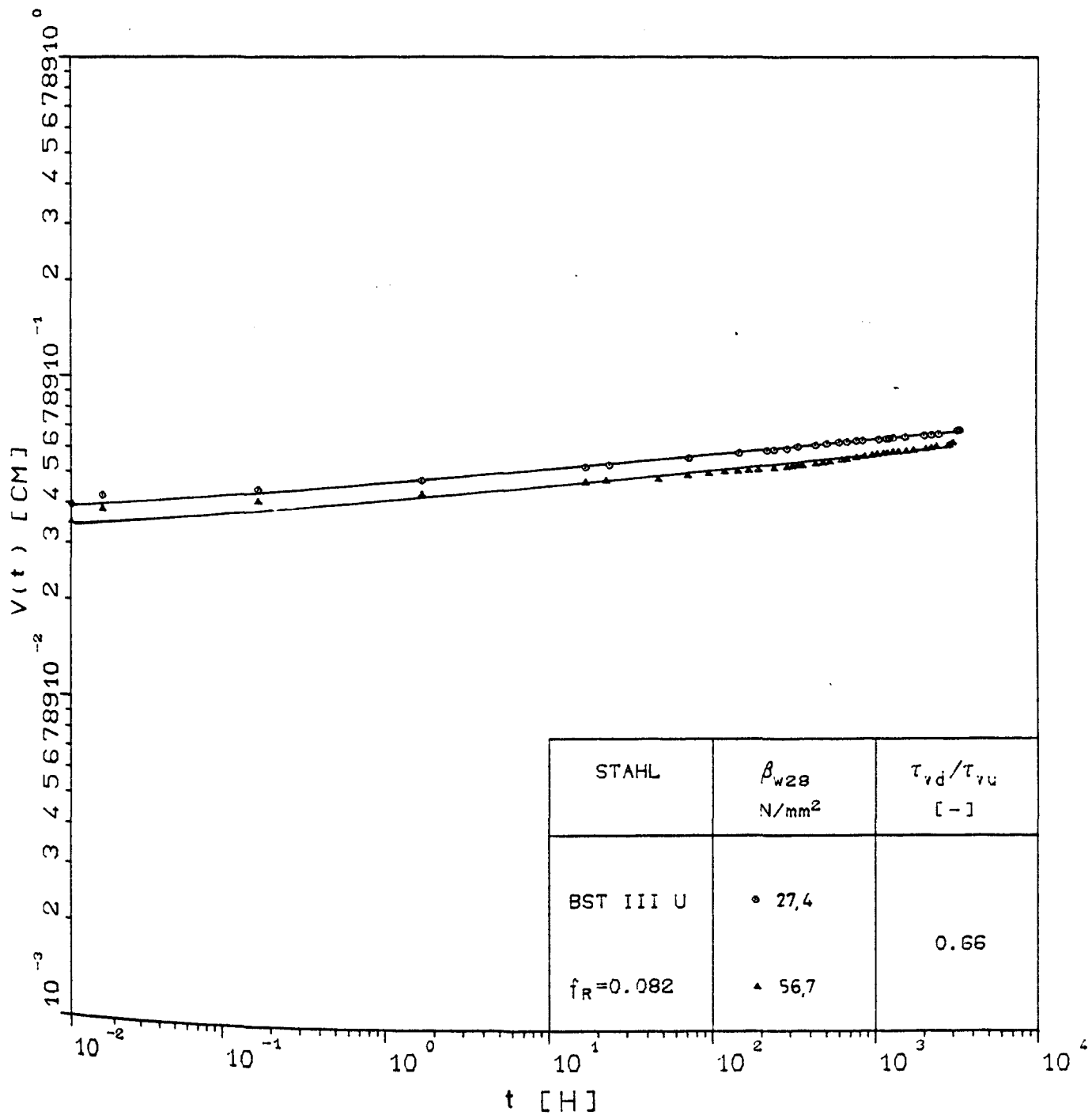
Einfluß des Lastniveaus auf die Kriechzahl bei konstanter Dauerbeanspruchung
(Versuche AKZ2.16 und AKZ2.04)



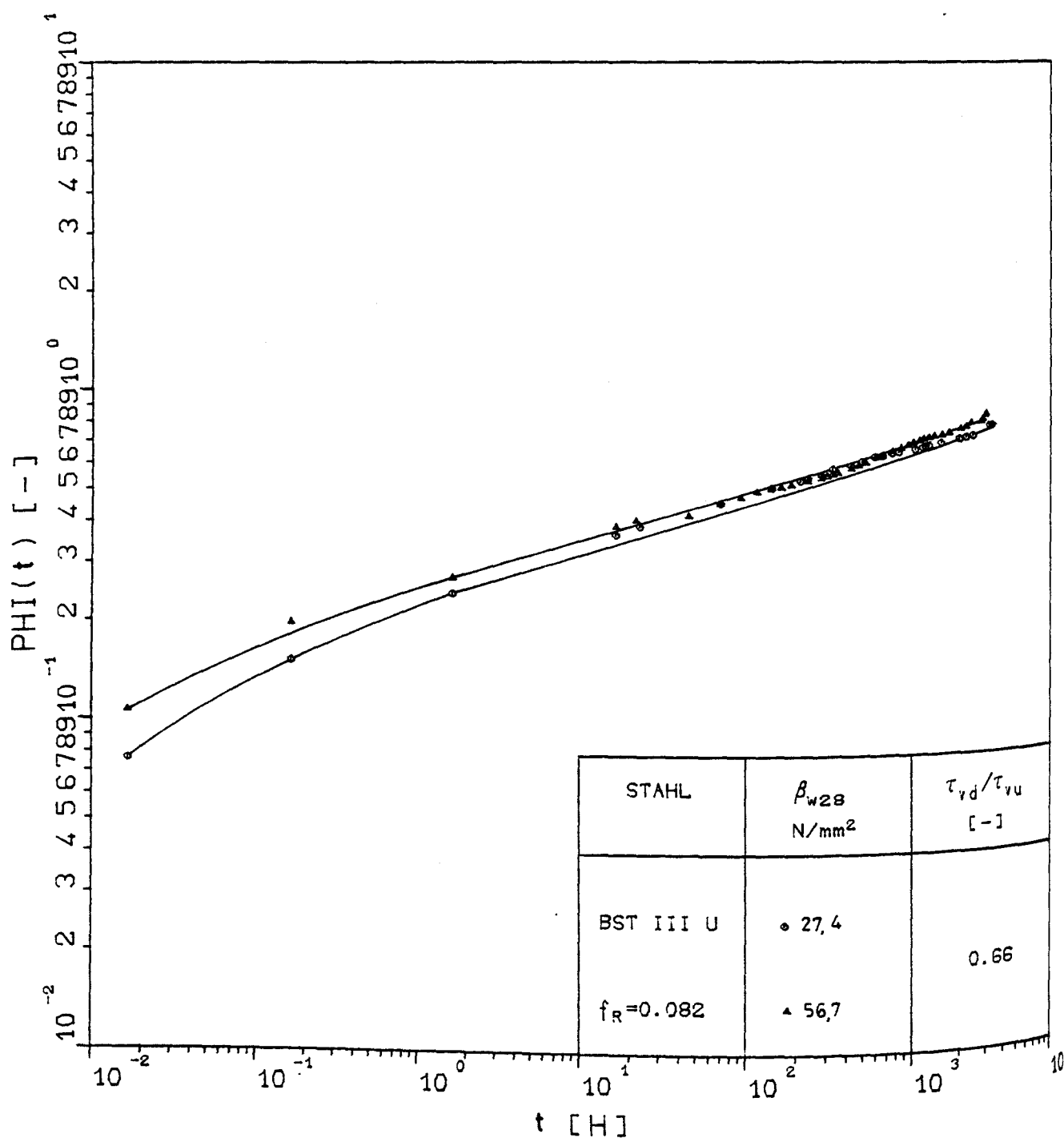
Einfluß des Lastniveaus auf die Kriechzahl bei konstanter Dauerbeanspruchung
(Versuche AKZ4.01 und AKZ4.08)



Einfluß des Lastniveaus auf die Kriechzahl bei konstanter Dauerbeanspruchung
(Versuche AKZ6.04 und AKZ6.06)



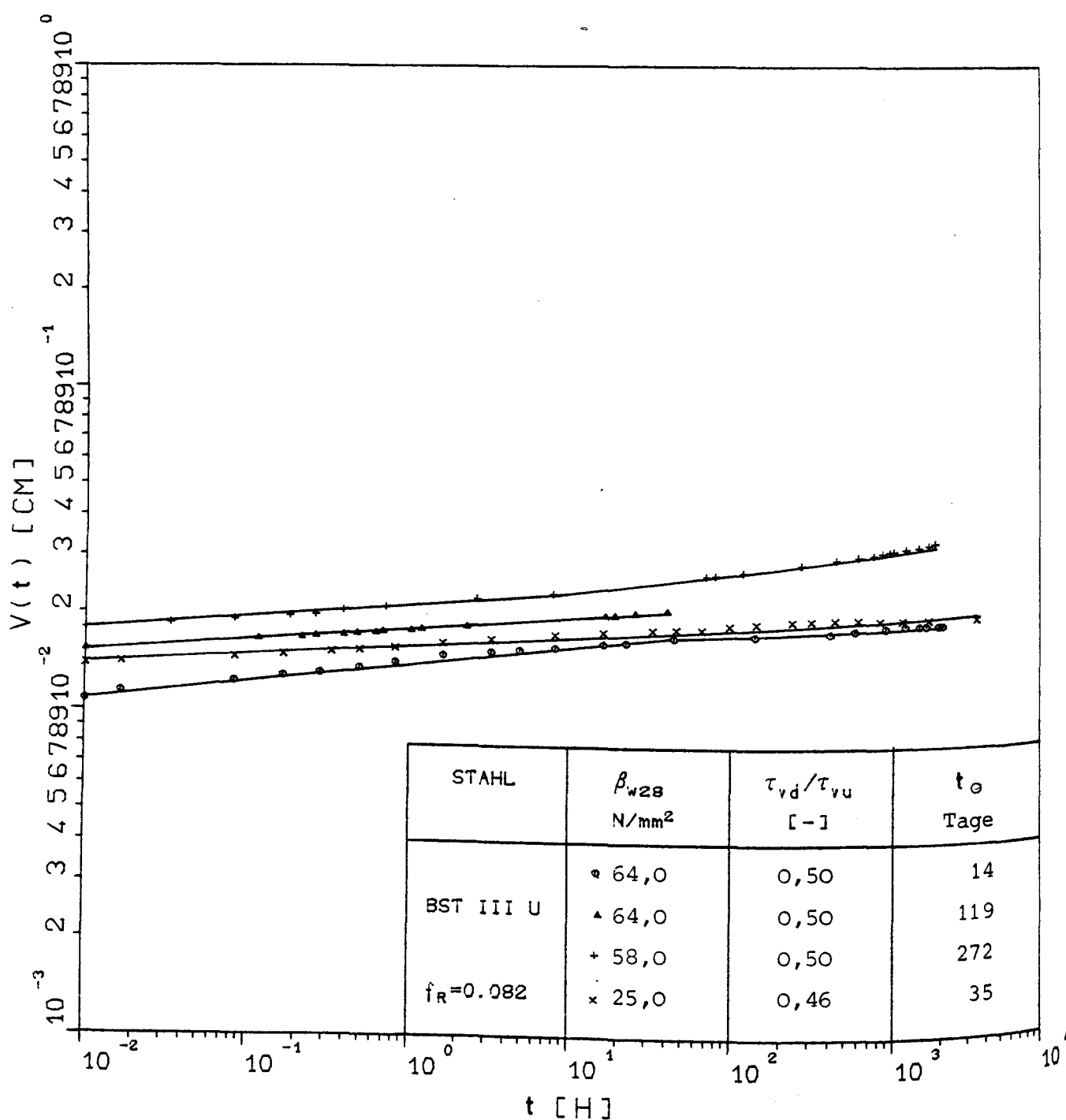
Einfluß der Betongüte auf die zeitabhängige Verschiebungszunahme unter konstanter Dauerbeanspruchung (Versuche AKZ2.04 und AKZ4.08)



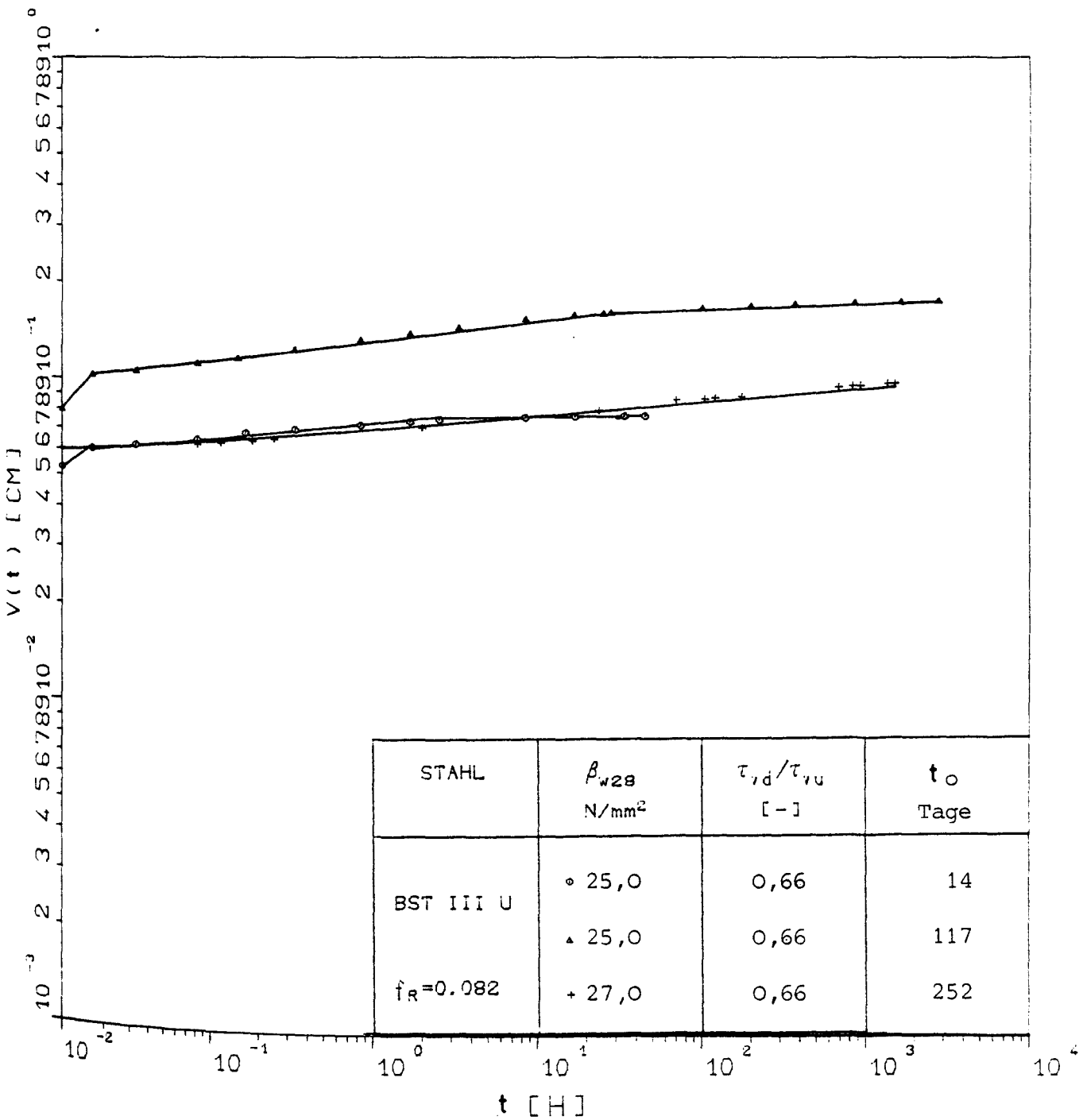
Einfluß der Betongüte auf die Kriechzahl bei konstanter Dauerbeanspruchung
(Versuche AKZ2.04 und AKZ4.08)

Festigkeiten und Belastungshöhen für die in jungem Alter belasteten Ausziehkörper

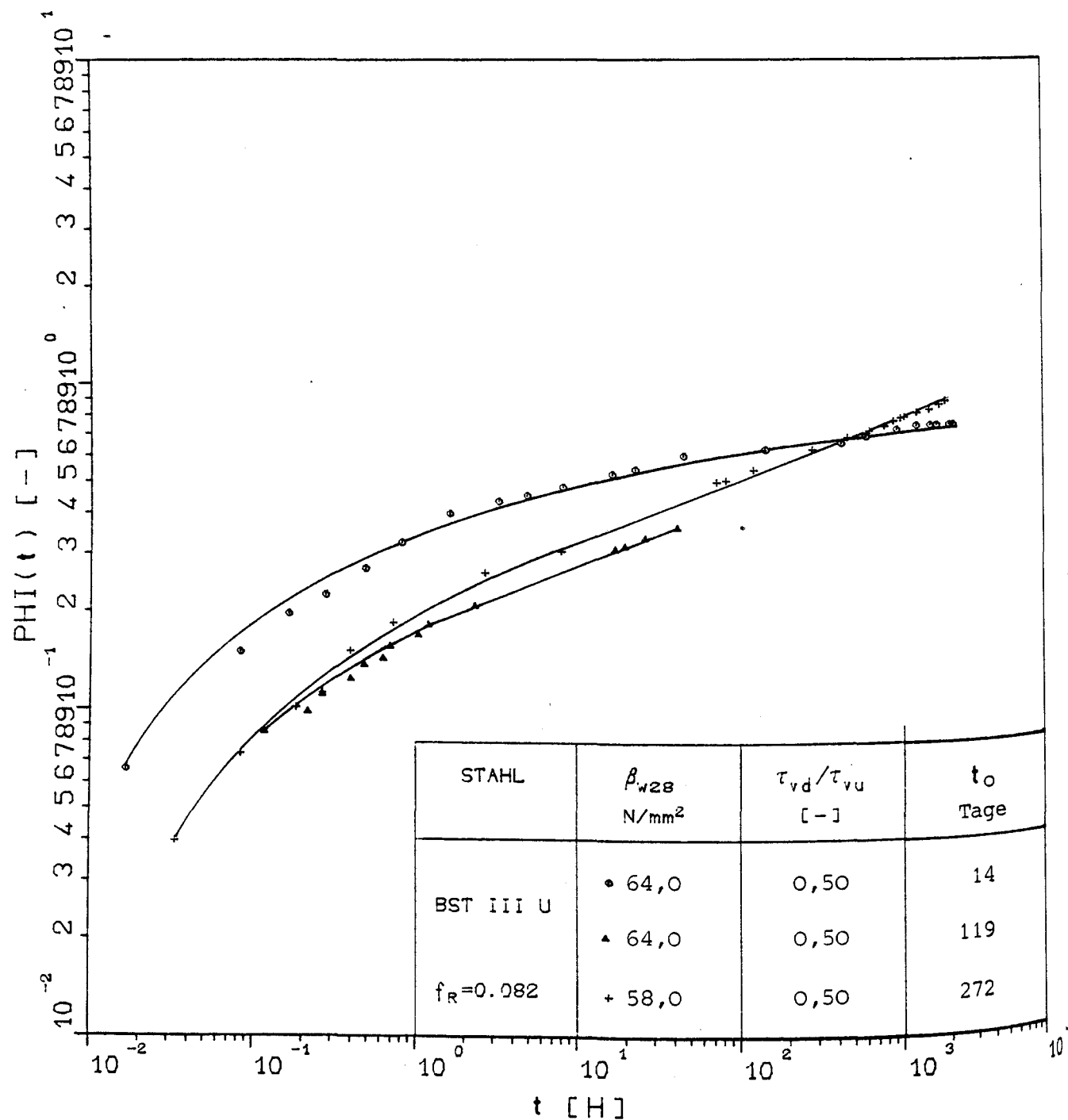
	AKZ6	AKZ8	AKZ8	AKZ9	AKZ9	AKZ11	AKZ15
Kurzzeitversuche $\tau_{vum}(t_0)$ [N/mm ²]	9,9	21,6	28,0	8,0	13,9	27,6	14,2
Dauerstandversuche τ_{vd}/τ_{vu} [-]	0.72;0.46	0.50;0.67	0,50	0,66	0,66	0,50	0,66
t_0 [Tage]	35	10	421	14	117	272	271
$\beta_w(t_0)$ [N/mm ²]	-	58,0	66,0	17,0	30,0	64,0	30,0



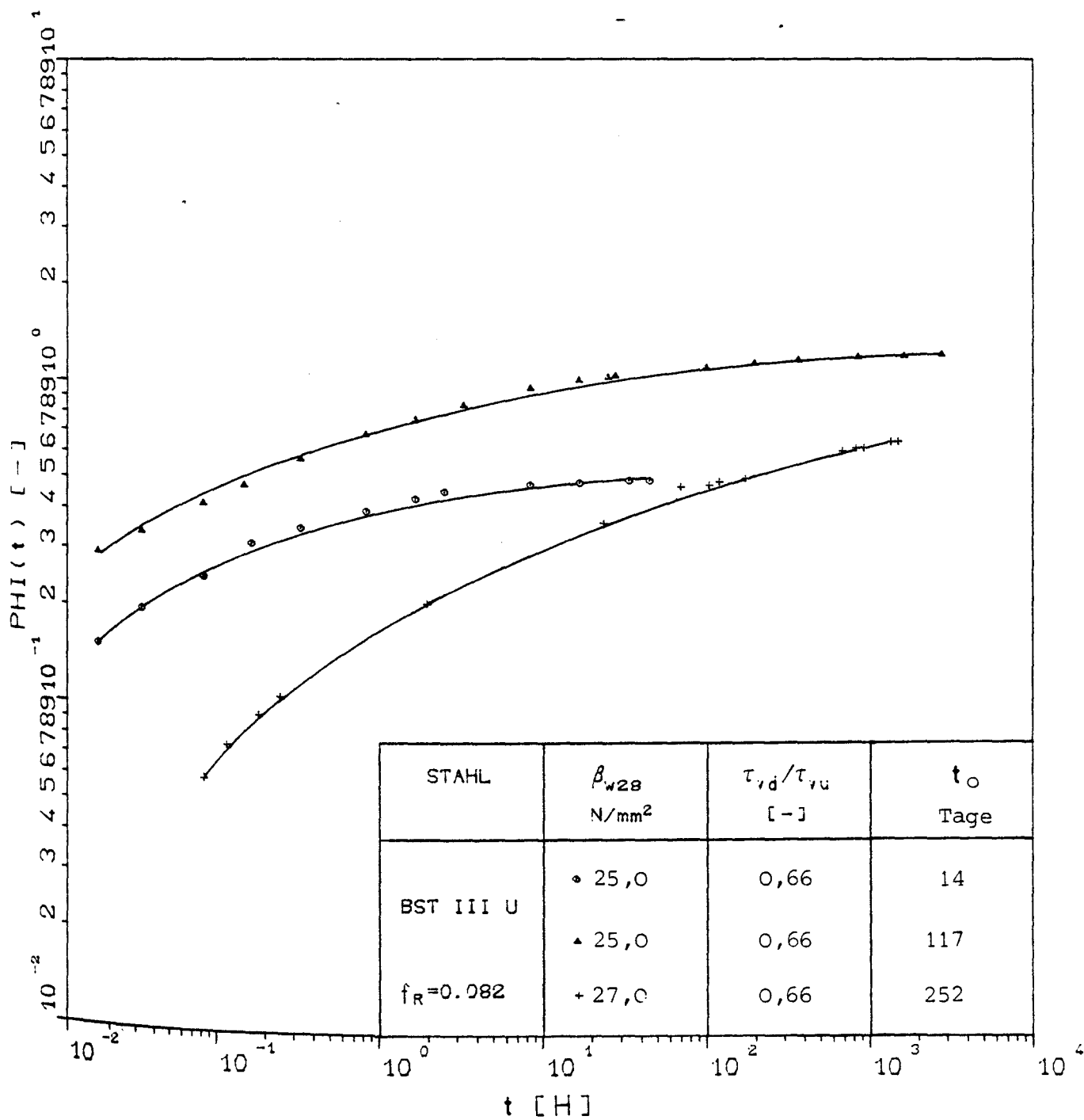
Einfluß des Belastungsalters t_0 auf die zeitabhängige Verschiebungszunahme unter konstanter Dauerbeanspruchung (Versuche AKZ8.05, AKZ8.14, AKZ11.19 und AKZ6.04)



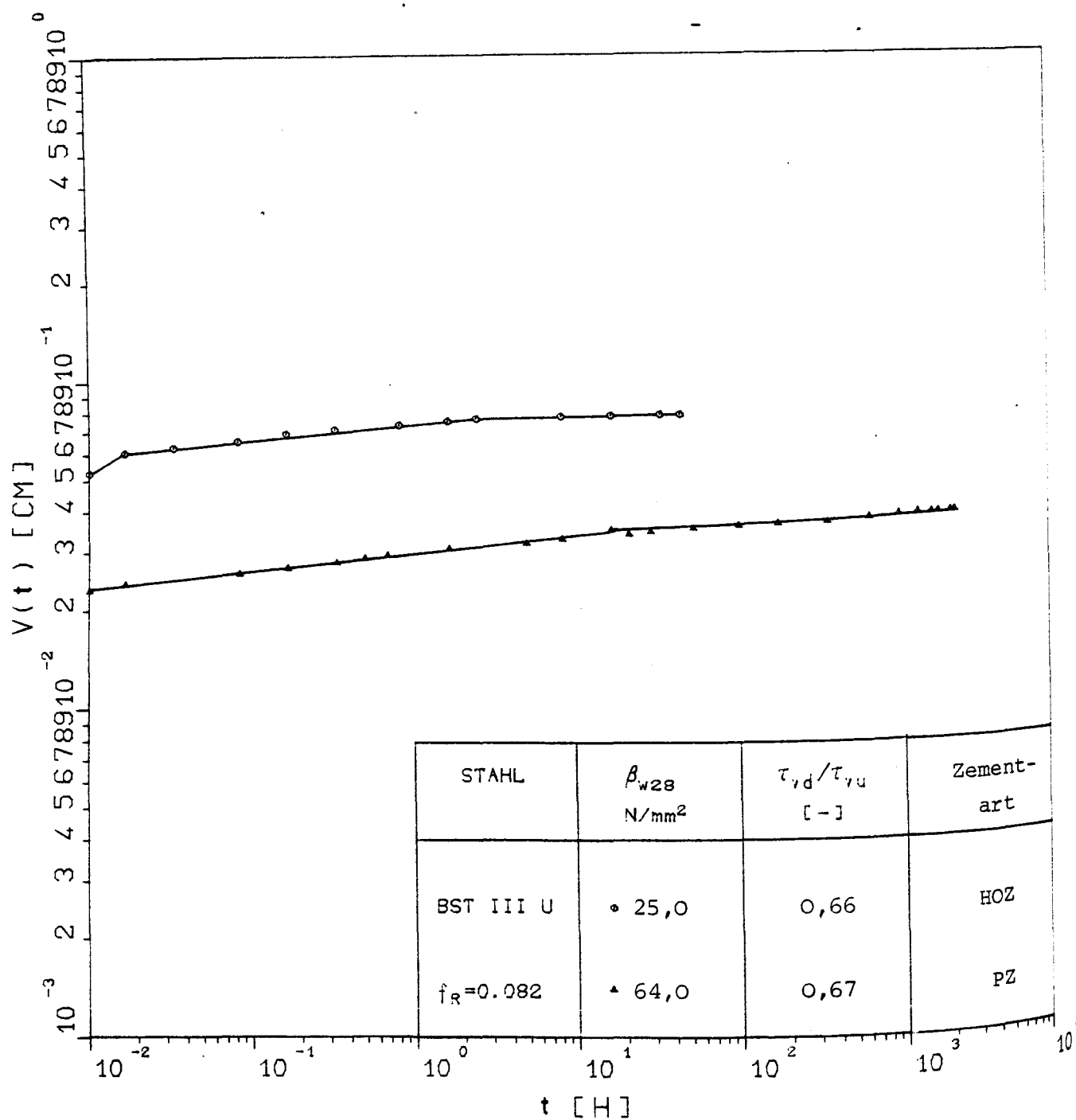
Einfluß des Belastungsalters t_0 auf die zeitabhängige Verschiebungszunahme unter konstanter Dauerbeanspruchung (Versuche AKZ9.06, AKZ9.13 und AKZ15.07)



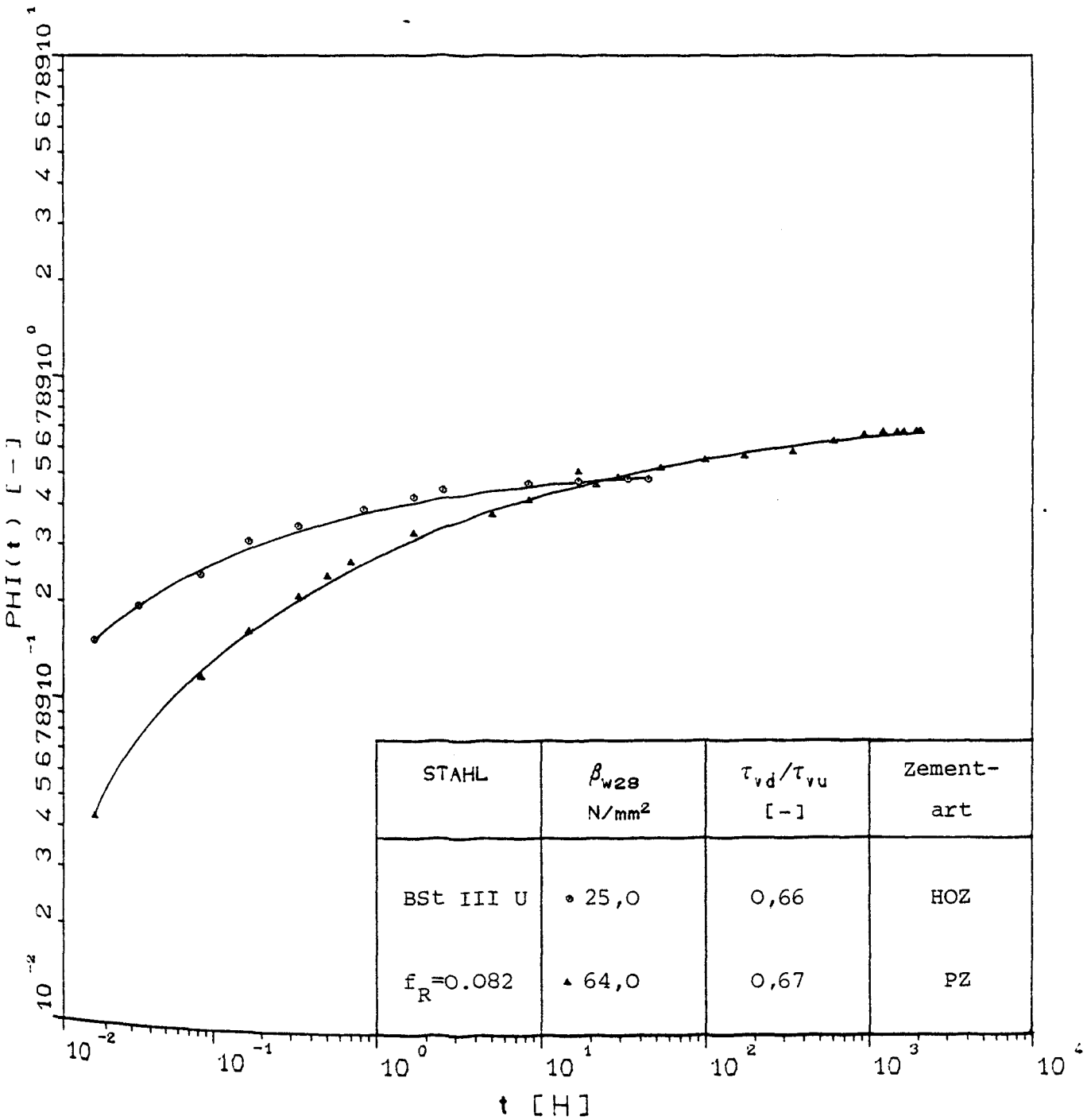
Einfluß des Belastungsalters t_0 auf die Kriechzahl bei konstanter Dauerbeanspruchung (Versuche AKZ8.05, AKZ8.14 und AKZ11.19)



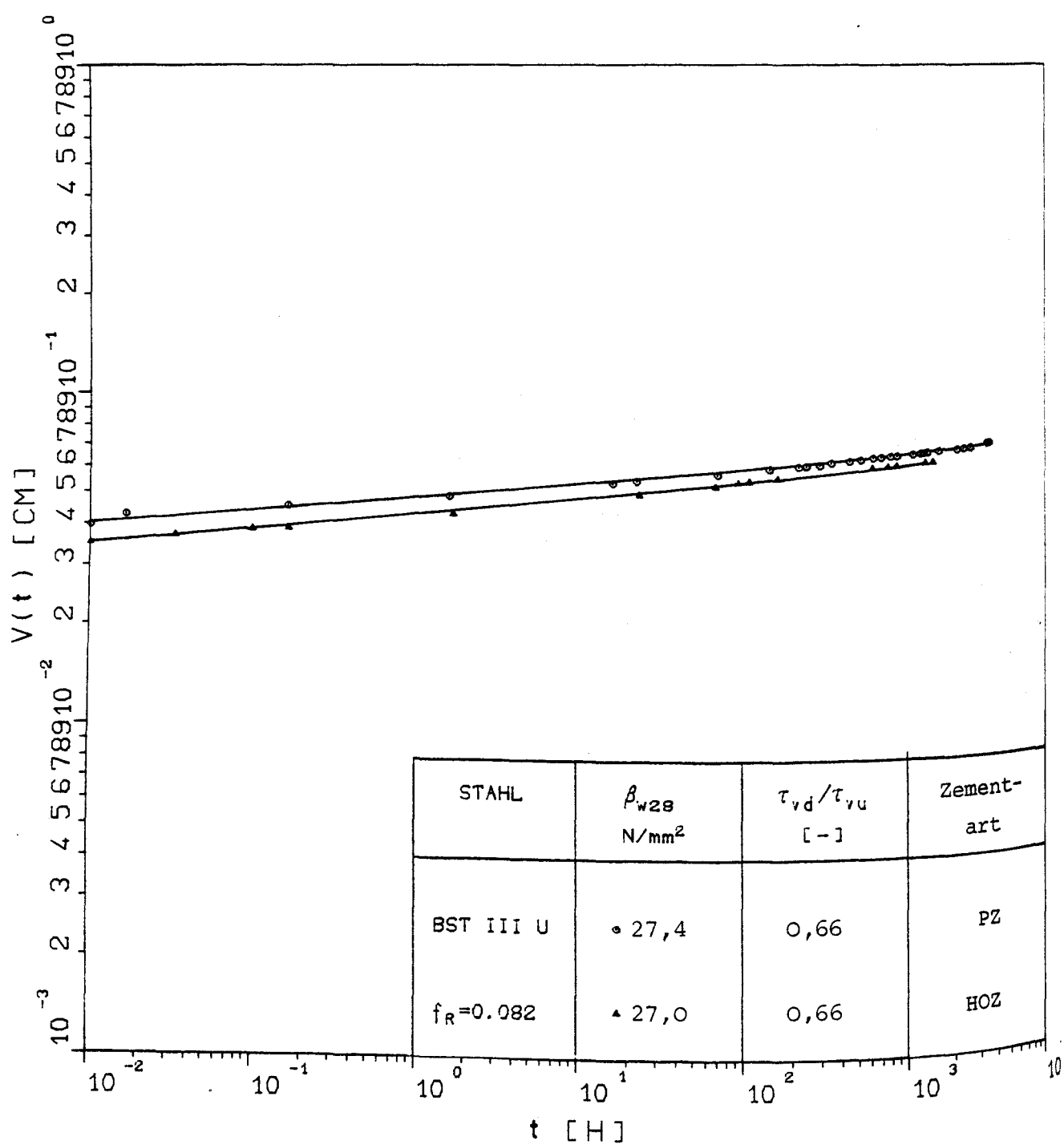
Einfluß des Belastungsalters t_0 auf die Kriechzahl bei konstanter Dauerbeanspruchung (Versuche AKZ9.06, AKZ9.13 und AKZ15.07)



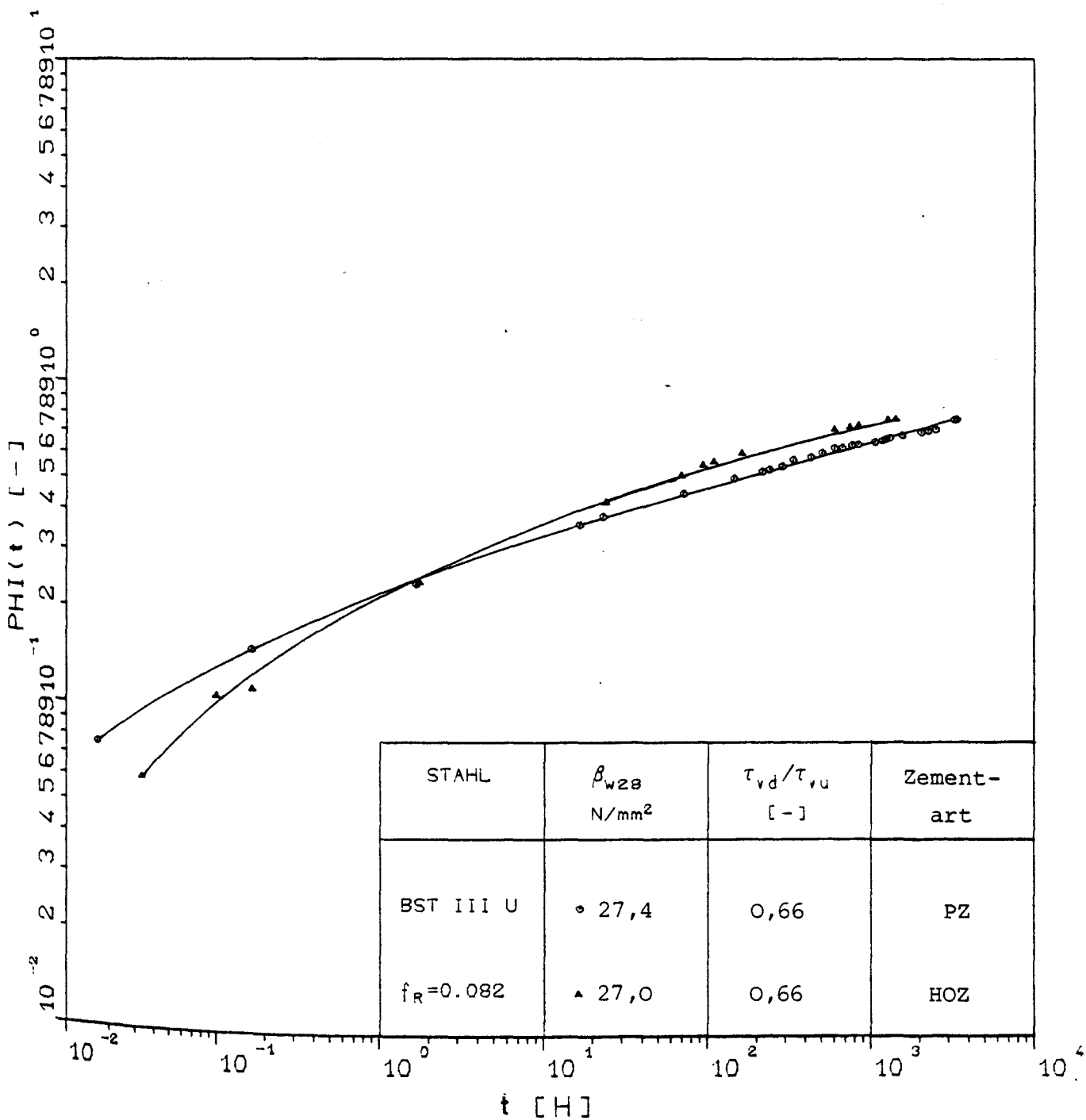
Einfluß der Zementart auf die zeitabhängige Verschiebungszunahme unter konstanter Dauerbeanspruchung (Versuche AKZ9.06 und AKZ8.07)



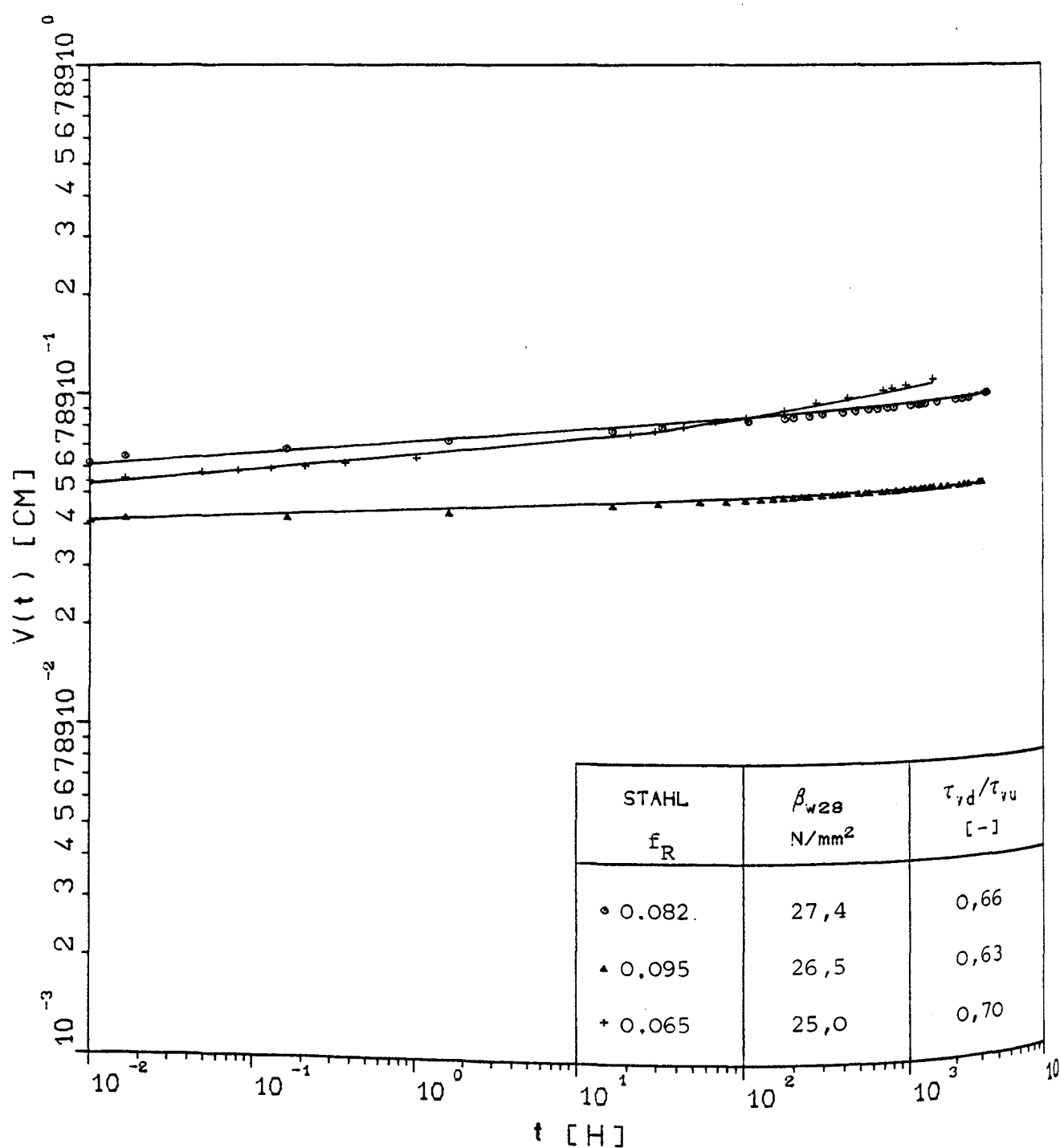
Einfluß der Zementart auf die Kriechzahl bei konstanter Dauerbeanspruchung
(Versuche AKZ9.06 und AKZ8.07)



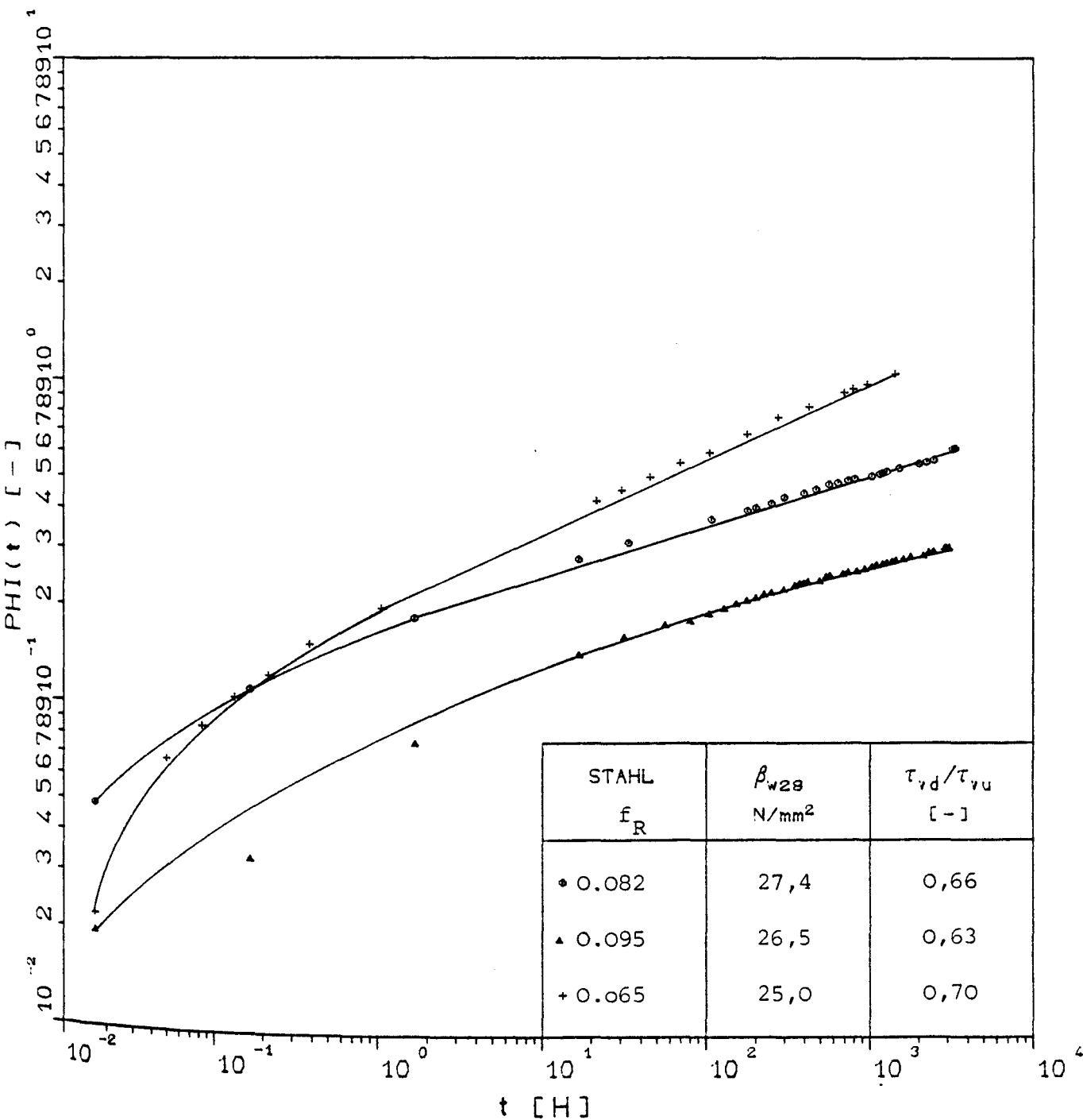
Einfluß der Zementart auf die zeitabhängige Verschiebungszunahme unter konstanter Dauerbeanspruchung (Versuche AKZ2.04 und AKZ15.03)



Einfluß der Zementart auf die Kriechzahl bei konstanter Dauerbeanspruchung
(Versuche AKZ2.04 und AKZ15.03)



Einfluß der bezogenen Rippenfläche auf die zeitabhängige Verschiebungszunahme unter konstanter Dauerbeanspruchung (Versuche AKZ2.15, AKZ3.20 und AKZ12.13)



Einfluß der bezogenen Rippenfläche auf die Kriechzahl bei konstanter Dauerbeanspruchung (Versuche AKZ2.15, AKZ3.20 und AKZ12.13)

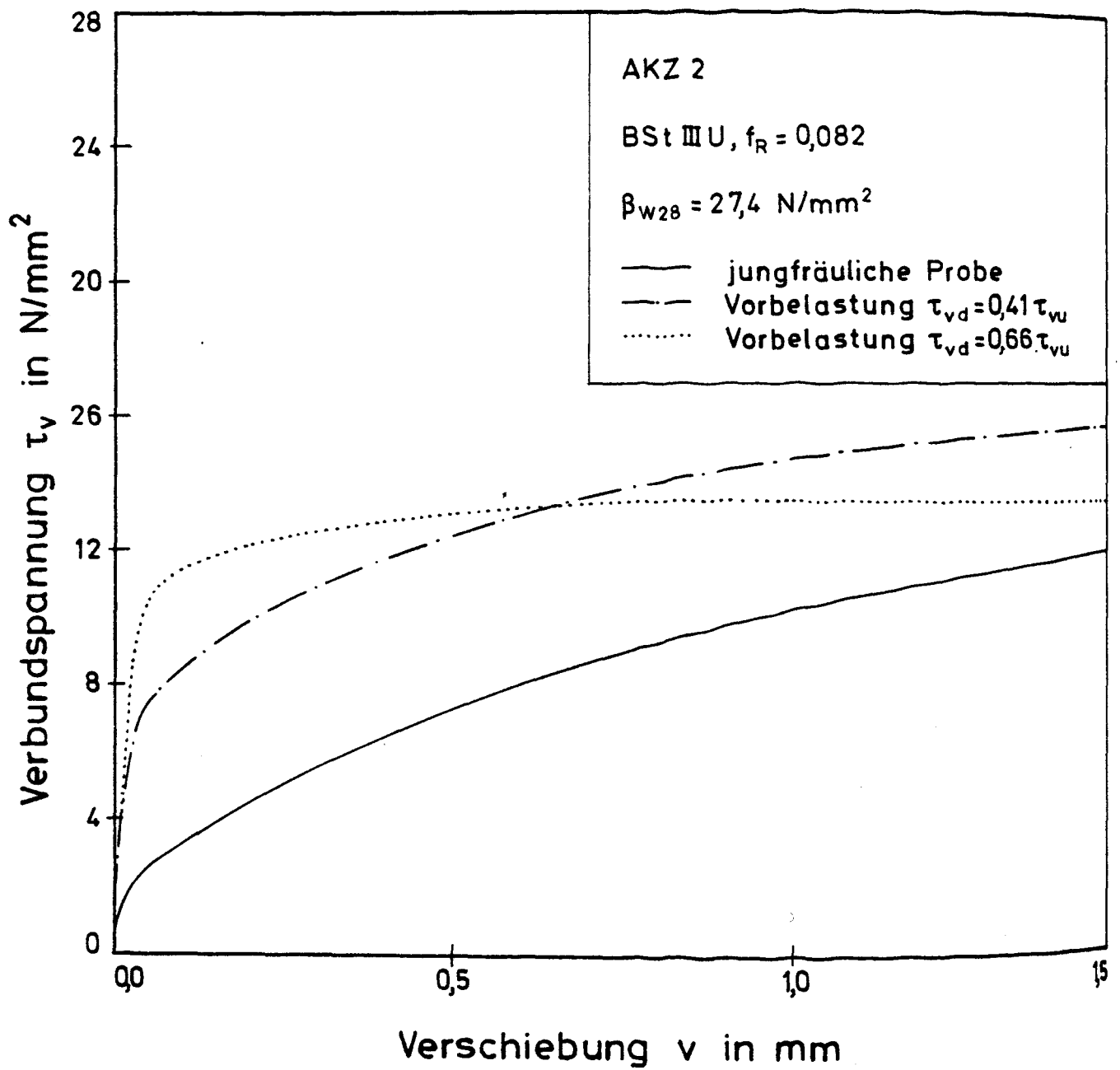
Verschiebungen $v(t)$ zu ausgewählten Zeitpunkten bei den Mehrstufenversuchen

Probe- körper	$\tau_{vd1}/\tau_{vu},$ τ_{vd2}/τ_{vu}	$v_{01}(t_0)$ μm	$v(t_0+t_1)$ μm	Δv μm	$v(t_0+t_e)$ μm
AKZ6.10 AKZ6.13* AKZ6.14	0.46,0.72	140 25 60	210 80 112	+27 + 6 +27	685 261 443
AKZ6.01 AKZ6.02 AKZ6.03	0.72,0.46	253 156 220	392 303 427	- 2 - 2 - 2	379 294 421
AKZ6.04 AKZ6.05 AKZ6.12	0.46	137 210 94	196 291 147	- - -	194 291 147
AKZ6.06 AKZ6.11 AKZ6.15	0.72	182 181 314	299 329 557	- - -	318 344 616
AKZ11.11 AKZ11.12	0.30,0.50	49 71	96 127	+55 +46	259 253
AKZ11.13 AKZ11.18	0.50,0.30	146 114	285 243	- 5 - 6	282 240
AKZ11.19 AKZ11.20	0,50	178 231	316 374	- -	336 393

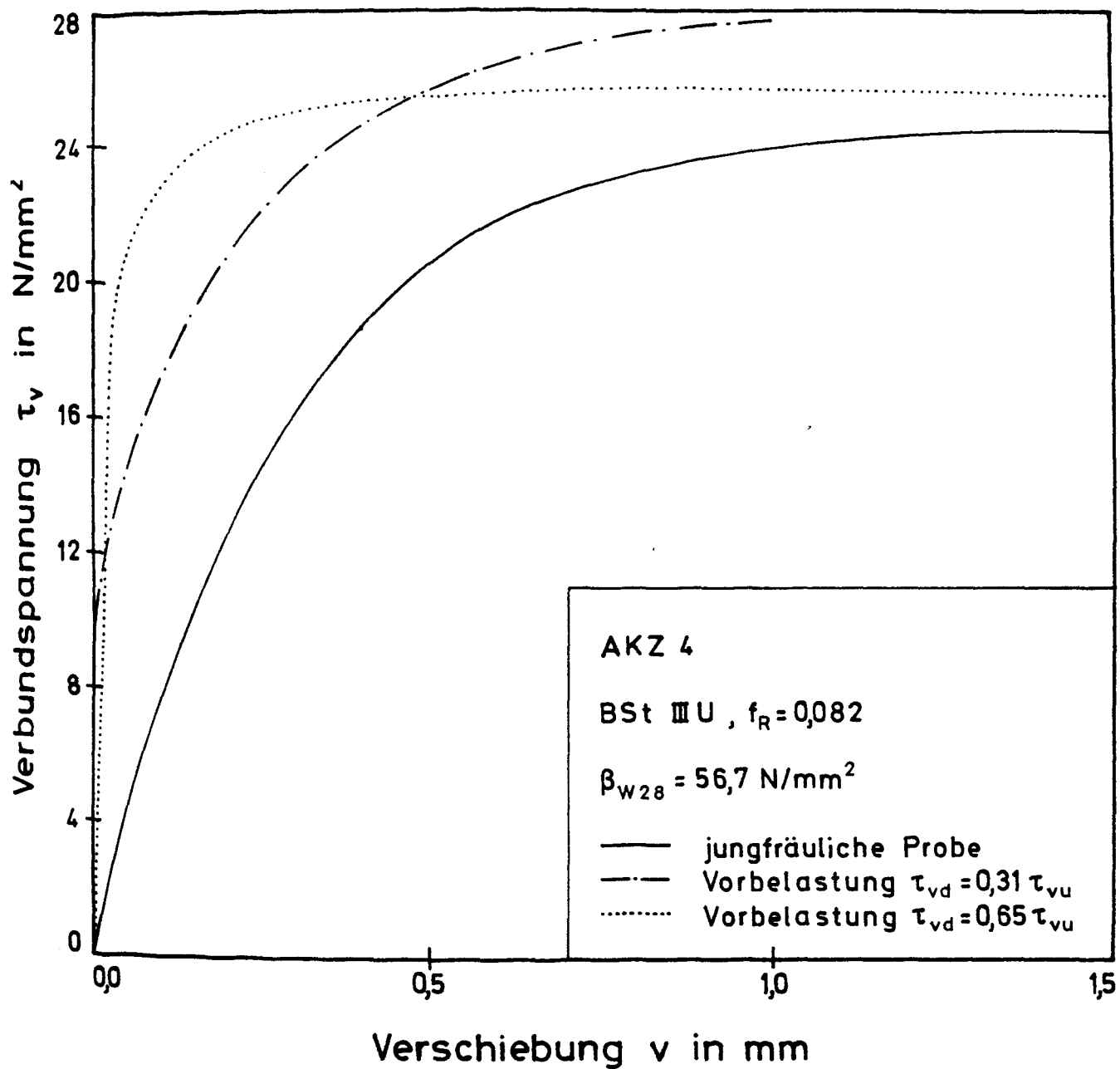
* Probekörper war vorbelastet

Spontan elastische und verzögert elastische Rückverformung

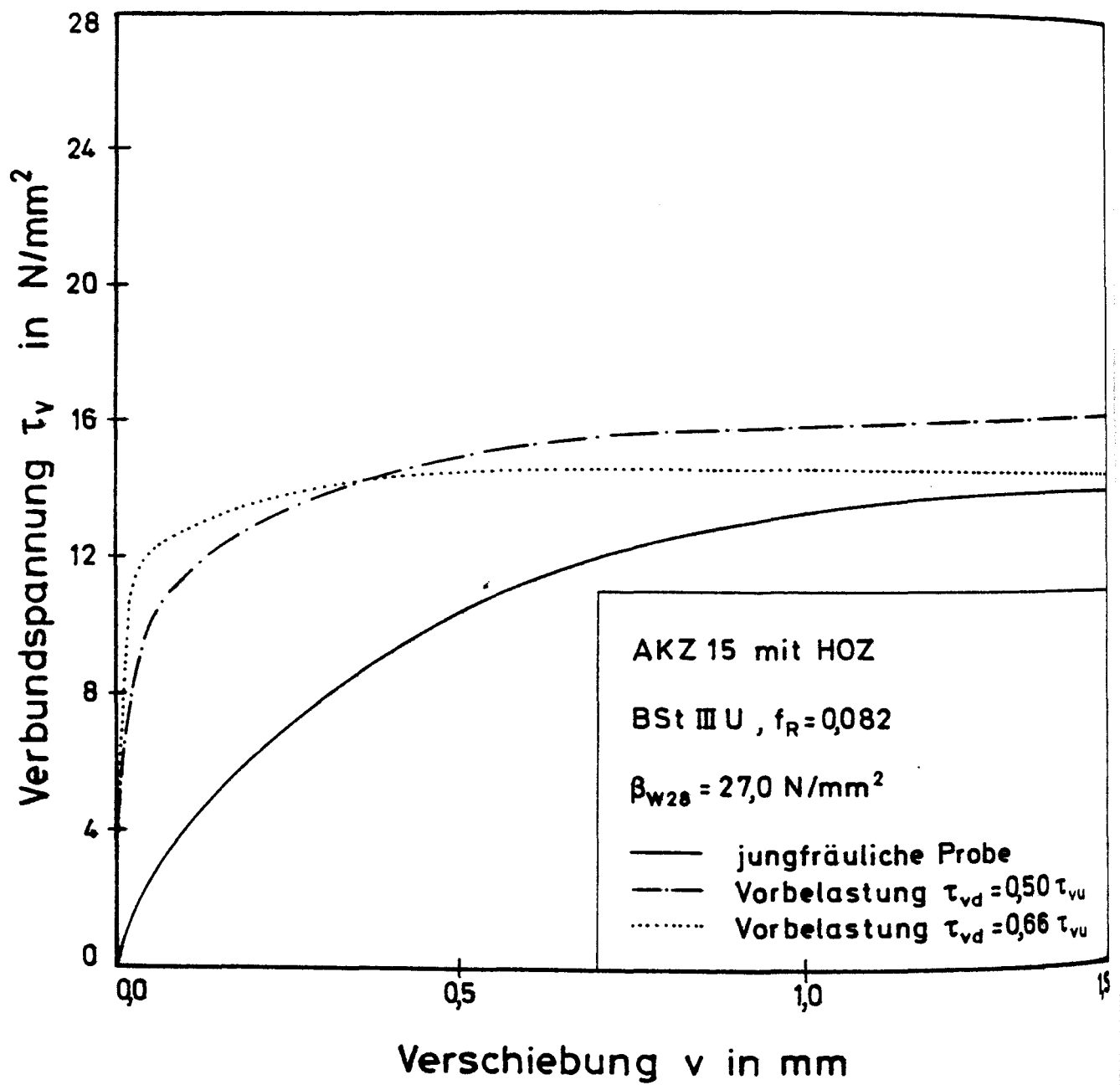
Probekörper	v_{R0} μm	v_{R0}/v_0 %	v_R ($t=1-2d$) μm	$v_R(t)/v_0$ %	τ_{vd}/τ_{vu} -
AKZ2.10	17	6,4	2,2	0,83	0,41
AKZ2.15	28	4,6	6,5	1,07	0,66
AKZ3.20	9	2,2	2,3	0,56	0,63
AKZ4.01	8	6,5	2,7	2,20	0,31
AKZ4.08	28,5	8,1	5,5	1,56	0,65
AKZ6.04	4,2	3,1	4,2	3,10	0,46
AKZ6.15	18,4	5,8	4,7	1,48	0,72
AKZ8.05	7,2	6,7	0	-	0,50
AKZ8.08	14	9,1	2,5	1,62	0,67
AKZ9.06	6,8	1,3	2,2	0,42	0,66
AKZ12.12	21	4,1	4	0,78	0,70
AKZ15.08	19	5,4	7	2,0	0,66
AKZ15.16	16	4,4	6	1,7	0,50
AKE1.07 Randlage, 2 ds	12	9,6	2	1,6	0,50
AKE1.06 zentrisch	19	11,7	4	2,5	0,67
AKE2.03 Ecklage, 2 ds	4	9,8	1	2,4	0,67
AKE2.03 zentrisch	27	8,2	8	2,4	0,67
AKE4.25 Randlage, 1 ds	9	9,0	4	4,0	0,70
AKE4.19 Randlage, 2 ds	10	7,3	4	2,9	0,70



Vergleich der τ_v - v -Beziehungen unvorbelasteter und vorbelasteter Versuchskörper der Serie AKZ2



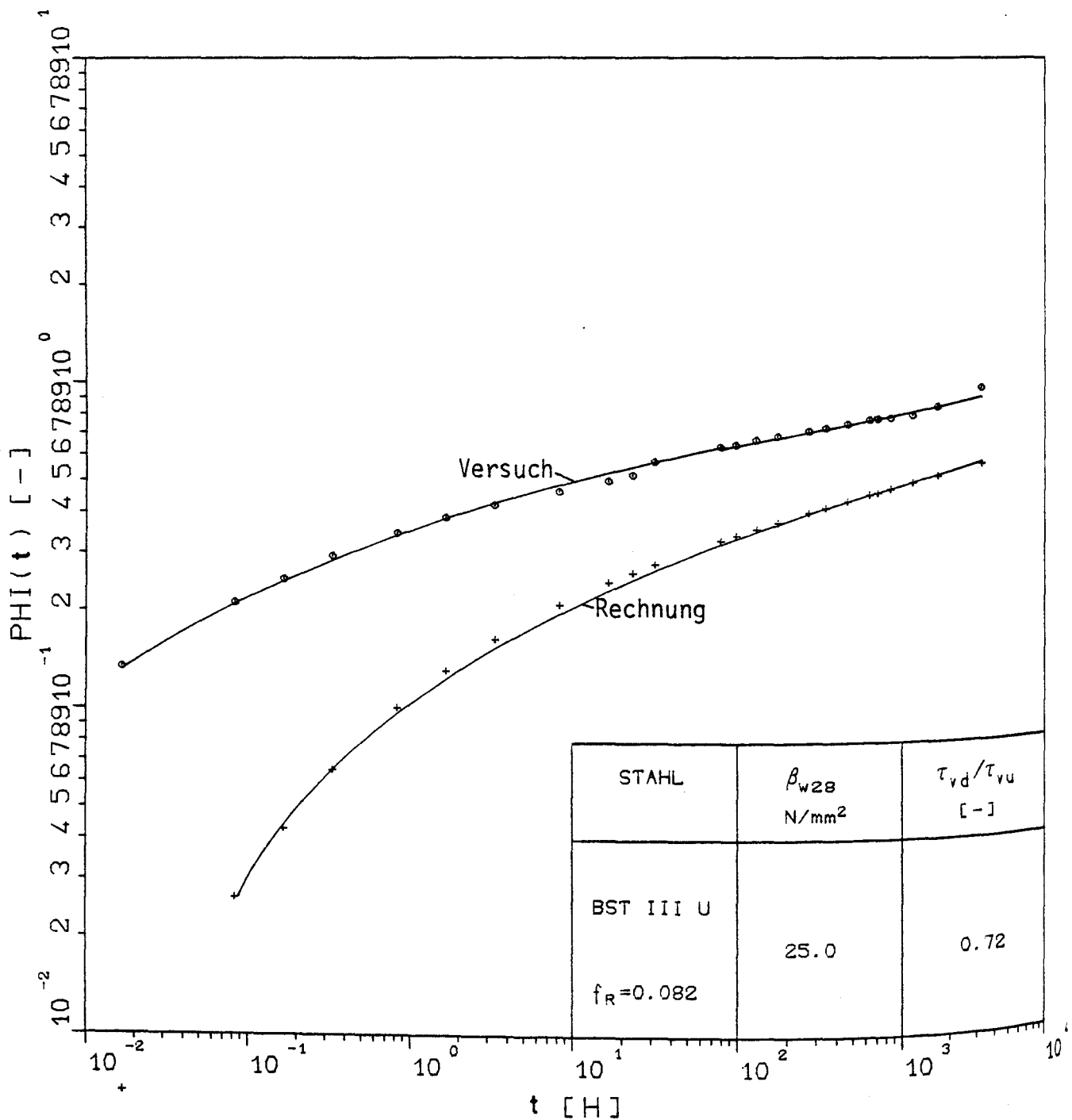
Vergleich der τ_v - v -Beziehungen unvorbelasteter und vorbelasteter Versuchskörper der Serie AKZ 4



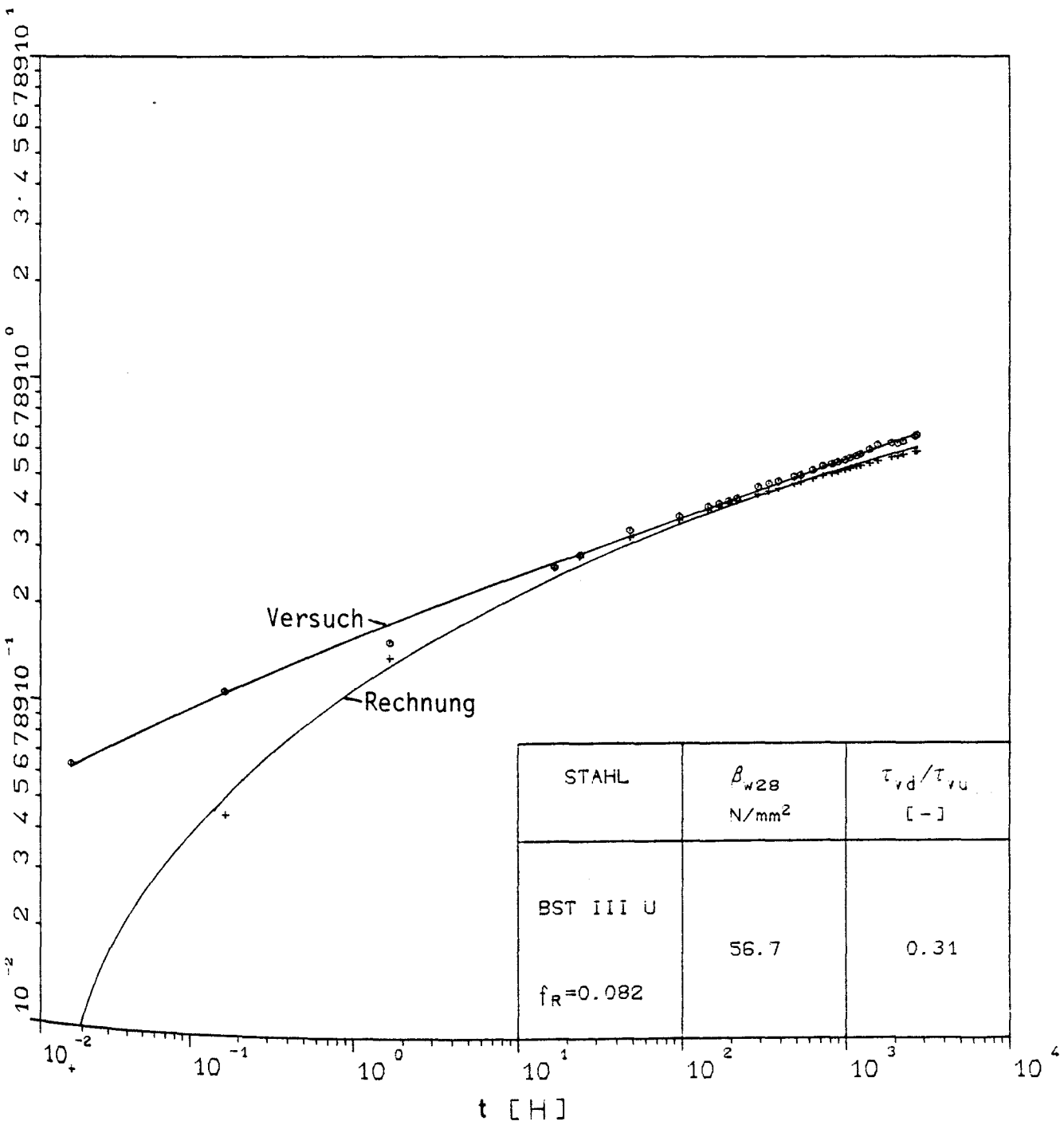
Vergleich der τ_v - v -Beziehung unvorbelasteter und vorbelasteter Versuchskörper der Serie AKZ 15

Zusammenstellung der mittleren Verbundfestigkeiten jungfräulicher ($\tau_{\text{vum}}(t_0)$)
und vorbelasteter Probekörper ($\tau_{\text{vum}}(t_0+t_e)$)

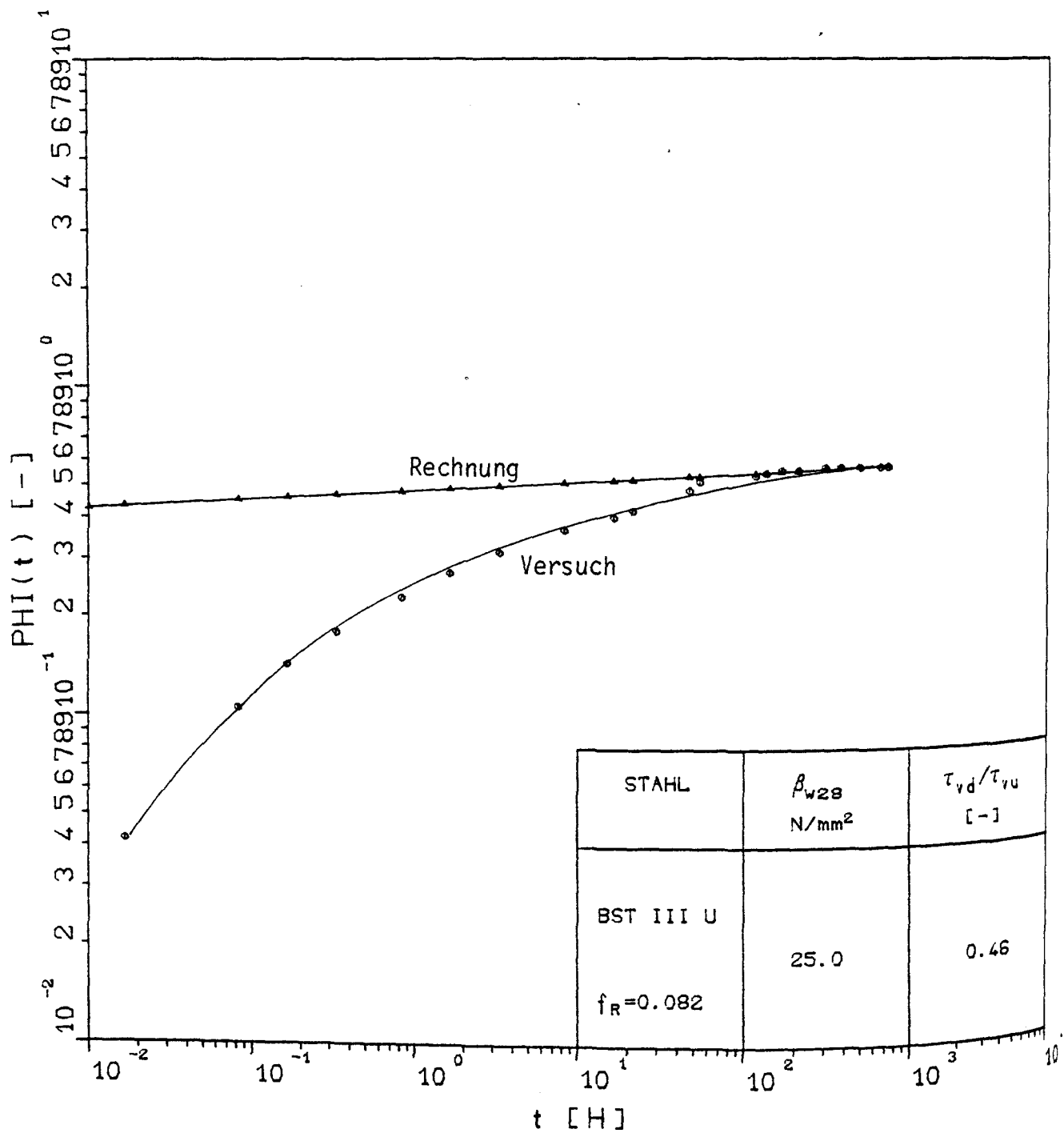
Betonier- serie	$\tau_{\text{vum}}(t_0)$ N/mm ²	$\tau_{\text{vum}}(t_0+t_e)$ N/mm ²	$\tau_{\text{vum}}(t_0+t_e)/\tau_{\text{vum}}(t_0)$ -
AKZ2	12,5	12,3	0,98
AKZ3	12,1	13,8	1,14
AKZ4	23,1	25,0	1,08
AKZ6	10,8	13,6	1,26
AKZ8	24,7	27,5	1,11
AKZ9	13,3	14,3	1,08
AKZ10	17,5	18,1	1,04
AKZ11	26,4	27,2	1,03
AKZ12	14,9	14,9	1,00
AKZ15	14,2	14,5	1,02
AKZ20	17,2	16,4	0,95
AKZ21	29,8	29,0	0,97
AKE1 zentrisch	18,3	17,7	0,97
AKE1 Randlage 2 ds	15,0	15,0	1,00
AKE1 Randlage 1 ds	12,7	13,6	1,07
AKE2 zentrisch	17,8	16,2	0,91
AKE2 Ecklage 2 ds	11,8	11,6	0,98
AKE4 Randlage 2 ds	12,1	13,2	1,09
AKE4 Randlage 1 ds	9,0	8,3	0,92



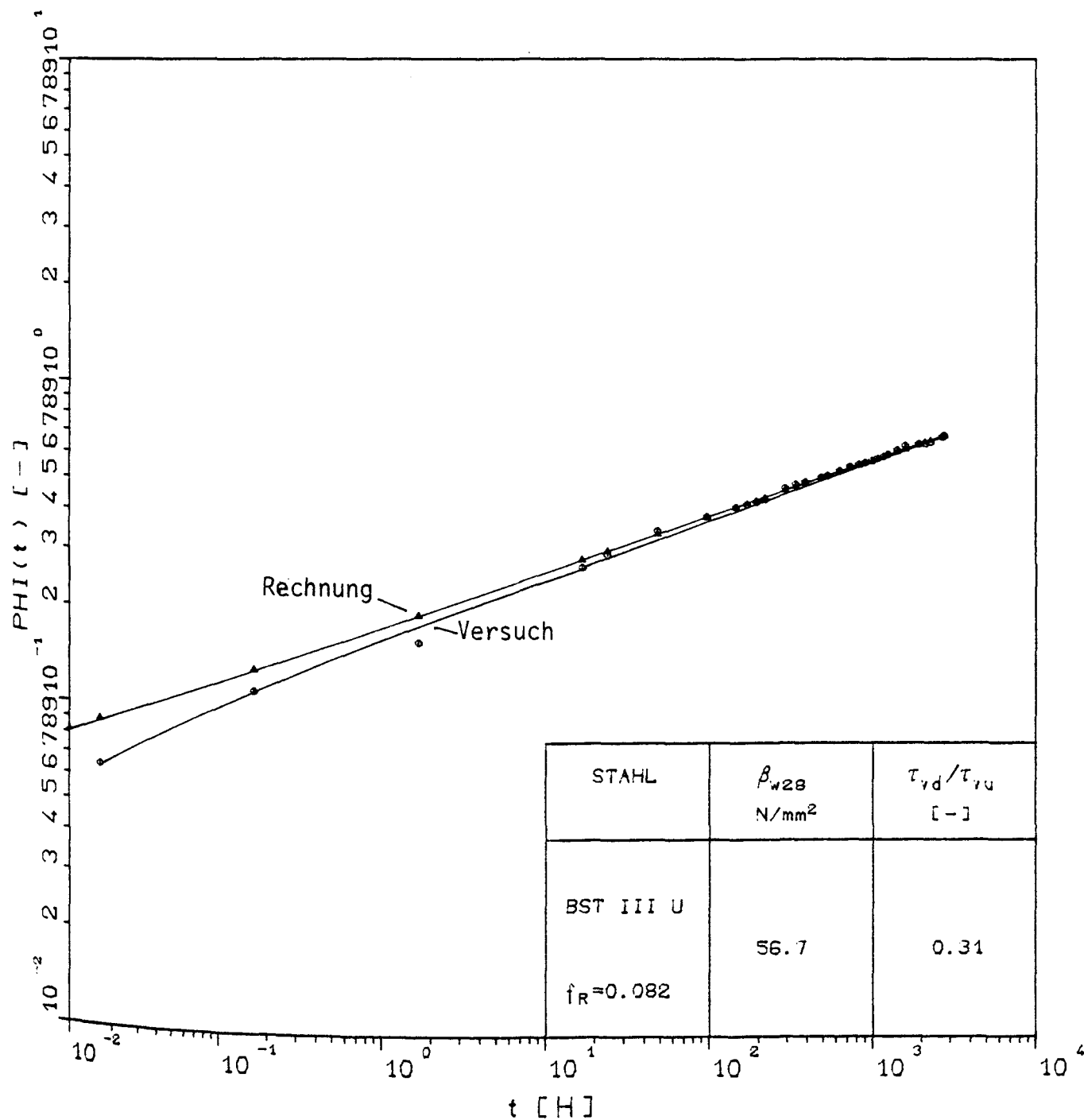
Vergleich von Versuchswerten mit nach dem Kriechansatz von Franke /3/ berechneten Kriechzahlen (Versuch AKZ 6.15)



Vergleich von Versuchswerten mit nach dem Kriechansatz von Franke /3/ berechneten Kriechzahlen



Vergleich von Versuchswerten mit nach dem Kriechansatz von Svensvik /4/ berechneten Kriechzahlen (Versuch AKZ6.12)



Vergleich von Versuchswerten mit nach dem Kriechansatz von Svensvik /4/ berechneten Kriechzahlen (Versuch AKZ4.01)

TEIL II

Verbundkriechversuche unter zyklischer Schwellbeanspruchung

Verbundkriechversuche unter zyklischer Schwellbeanspruchung

1. Versuchsprogramm
2. Ausbildung und Herstellung der Versuchskörper
3. Baustoffe
4. Versuchseinrichtung und Versuchsdurchführung
5. Kurzzeitversuche
6. Ergebnisse der Verbundkriechversuche unter zyklischer Schwellbeanspruchung
 - 6.1 Einfluß der Schwingbreite
 - 6.2 Einfluß der Frequenz
 - 6.3 Einfluß der Betongüte
 - 6.4 Einfluß des Belastungsalters
 - 6.5 Einfluß der bezogenen Rippenfläche
 - 6.6 Einfluß der Betondeckung
7. Verhalten der Versuchskörper nach zyklischer Schwellbeanspruchung
8. Zusammenfassung der Versuchsergebnisse
9. Nachrechnung von Versuchsergebnissen mit bekannten Kriechansätzen
10. Vergleich des Verbundkriechverhaltens unter Schwellbeanspruchung und unter konstanter Dauerlast
11. Offene Fragen

1. VERSUCHSPROGRAMM

Das Versuchsprogramm für die Verbundkriechuntersuchungen unter Schwellbeanspruchung sah die Variation folgender Parameter vor:

- Schwingbreite
- Frequenz
- Betongüte
- bezogene Rippenfläche
- Belastungsalter
- Betondeckung

Die Versuchskörper für die Verbundkriechuntersuchungen unter zyklischer Schwellbeanspruchung bzw. unter konstanter Dauerlast (siehe Teil I dieses Berichtes) wurden in Serien gefertigt und mit AKZ1 bis AKZ25 (zylindrischer Ausziehkörper mit zentrischem Bewehrungsstab) bzw. AKE1 bis AKE10 (quadratischer Ausziehkörper mit in der Regel exzentrischer Stablage) bezeichnet. Eine Serie zentrischer Ausziehkörper besteht aus jeweils 20, eine Serie exzentrischer Ausziehkörper aus jeweils 21 oder 28 Versuchskörpern.

In Anlage 1 sind die bei den einzelnen Betonierserien variierten Parameter für die Schwellversuche zusammengestellt.

Mit Ausnahme der Schwellversuche der Serien AKE9 und AKE10 sowie AKZ24, $f = 1\text{Hz}$, ist das Versuchsprogramm erfüllt. Die noch anstehenden Untersuchungen sind nach Ablauf der zur Zeit laufenden Förderperiode (bis August 1985) abgeschlossen.

2. AUSBILDUNG UND HERSTELLUNG DER VERSUCHSKÖRPER

siehe Teil I, Abschnitt 2

3. BAUSTOFFE

siehe Teil I, Abschnitt 3

4. VERSUCHSEINRICHTUNG UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Die Kurzzeitversuche und die dynamischen Versuche wurden in einem Prüfrahmen durchgeführt, dessen Aufbau in Anlage 2 schematisch dargestellt ist. Der Versuchsstand besteht aus: Prüfrahmen, Prüfzylinder und Kraftmeßdose. Der Ausziehkörper wird auf eine mit dem Stahlrahmen verschraubte Traverse aufgesetzt. Der Stahlstab wird durch eine Bohrung geführt und unten in einem "Stahlkäfig" durch eine Keilverankerung gehalten.

Von jeder Versuchskörperserie wurden zunächst mindestens 3 Kurzzeitversuche durchgeführt. Aus den aufgebrachten Lasten wurden die Verbundspannungen unter Annahme einer gleichmäßigen Verteilung über die Verbundlänge ℓ_v berechnet:

$$\tau_v = \frac{F}{u_s \cdot \ell_v} \quad (4.1)$$

Die Höhe der Oberspannung τ_v^o und der Unterspannung τ_v^u bei den Schwellversuchen wurde dann als Teil der im Kurzzeitversuch bestimmten mittleren Verbundspannung τ_{vum} gewählt.

Die Verschiebungsmessung am unbelasteten Stabende erfolgte bei den Kurzzeitversuchen sowie bei den dynamischen Versuchen über induktive Wegaufnehmer, deren Taster auf den Enden der Stäbe aufsaßen. Während des Belastungsvorgangs wurden die Kraft und die Stabendverschiebung kontinuierlich mit einem x-y-Schreiber aufgezeichnet. Bei den Schwellversuchen wurde in der Regel zunächst die Oberspannung angefahren. Nach Erreichen der Oberspannung wurde die Mittelspannung eingestellt. Die Versuchskörper wurden dann mit der vorgesehenen Spannungsamplitude und der Frequenz durch max. $N = 10^6$ Lastspiele im Schwellbereich belastet. Die zyklische Spannungs-Zeit-Geschichte entsprach einer Sinusfunktion.

Die Stabendverschiebung wurde bei den ersten Versuchen in Abhängigkeit von einem vorgegebenen Zeittakt über einen angeschlossenen Spitzenwertschreiber ausgedruckt. Da sich bei den Versuchen mit der hohen Frequenz hierbei Schwierigkeiten ergaben, wurde bei allen weiteren Versuchen die Stabendverschiebung mit einem x-y-Schreiber aufgezeichnet. Die Verschiebung wurde sowohl bei Ober- $v^0(N)$ als auch bei Unterspannung $v^u(N)$ gemessen. Bei allen Darstellungen wurde jedoch nur die Verschiebung bei Oberspannung aufgetragen, da die Verschiebungsdifferenz $\Delta v(N) = v^0(N) - v^u(N)$ sehr gering ist und über die Lastspielzahl annähernd konstant bleibt (Bild 4.1), d. h. $v(N) \cong v^0(N)$.

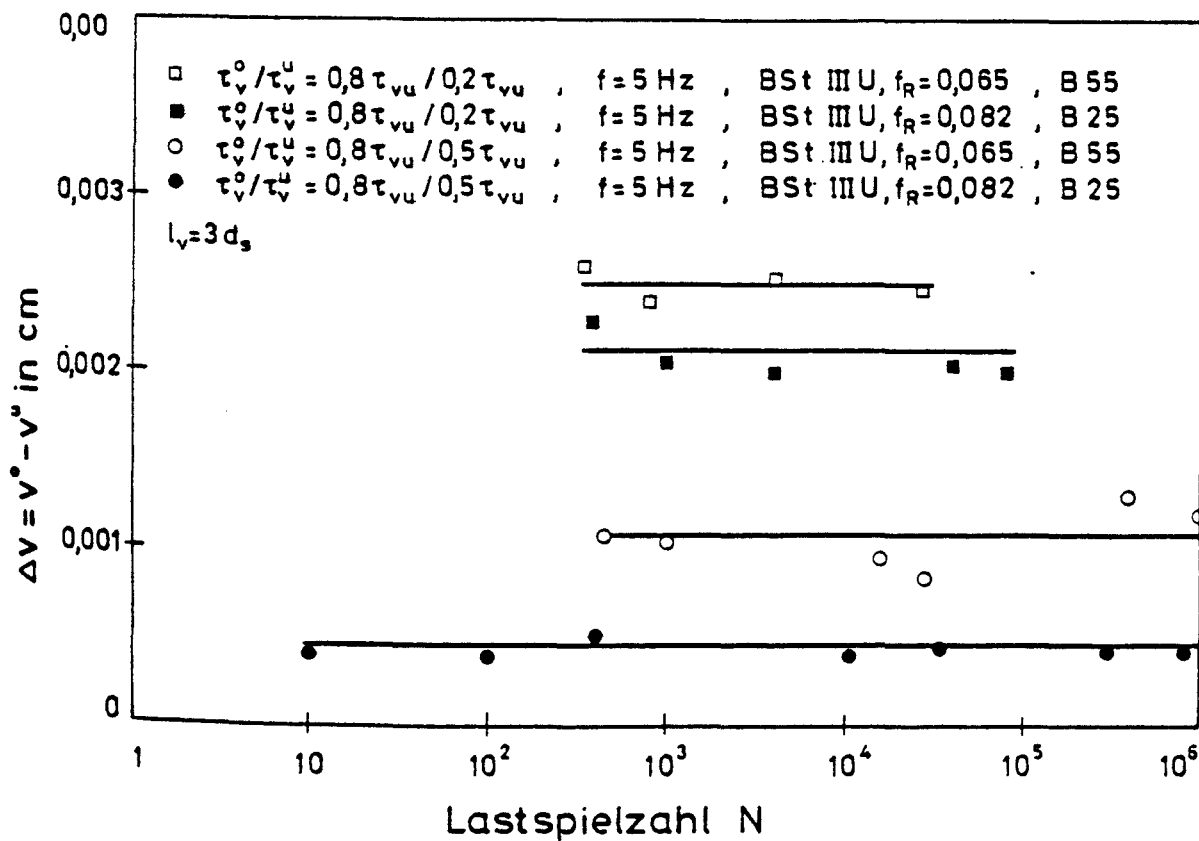


Bild 4.1 Verschiebungsdifferenz Δv zwischen Verschiebung v^0 bei Oberspannung τ_v^0 und Verschiebung v^u bei Unterspannung τ_v^u in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N

Nach Beendigung der Schwellversuche wurden alle Versuchskörper, die während der Versuche nicht versagt hatten, zur Ermittlung der Resttragkraft einer Kurzzeitbeanspruchung unterworfen. Anschließend wurde jeder Ausziehkörper gespalten und auf Unregelmäßigkeiten im Verbundbereich (z.B. Lunker) überprüft. Zusätzlich wurde die Verbundlänge nachgemessen.

5. KURZZEITVERSUCHE

In den Anlagen 3 und 4 sind die nach Gleichung 4.1 berechneten Verbundbruchspannungen τ_{vu} angegeben. Aus der Tabelle ist auch die bezogene Verbundfestigkeit τ_{vu}/β_w zu entnehmen, wobei die Würfel-druckfestigkeit bei Versuchsbeginn angesetzt wurde.

Das Versagen der zylindrischen Versuchskörper erfolgte bei den niederfesten und hochfesten Betonen stets durch Stabauszug. Die quadratischen Ausziehkörper mit exzentrischer Stablage zeigten immer Sprengbrüche. Typische Bruchbilder sind in Anlage 5 zusammengestellt.

Bild 5.1 zeigt den Abfall der Verbundfestigkeiten mit zunehmender exzentrischer Stablage. Sager /1/ hat einen Einfluß der Betondeckung auf die Verbundfestigkeit erst ab $c \approx 3d_s$ festgestellt. Dies wurde bei der Darstellung in Bild 5.1 berücksichtigt. Der Vergleich der τ_v -v-Beziehungen in dem Bild 5.2 macht deutlich, daß mit den Verbundfestigkeiten auch die zugehörigen Verschiebungen mit geringer werdender Betondeckung abnehmen.

Auf eine weitergehende Auswertung der Kurzzeitversuche wird hier aus Platzgründen verzichtet.

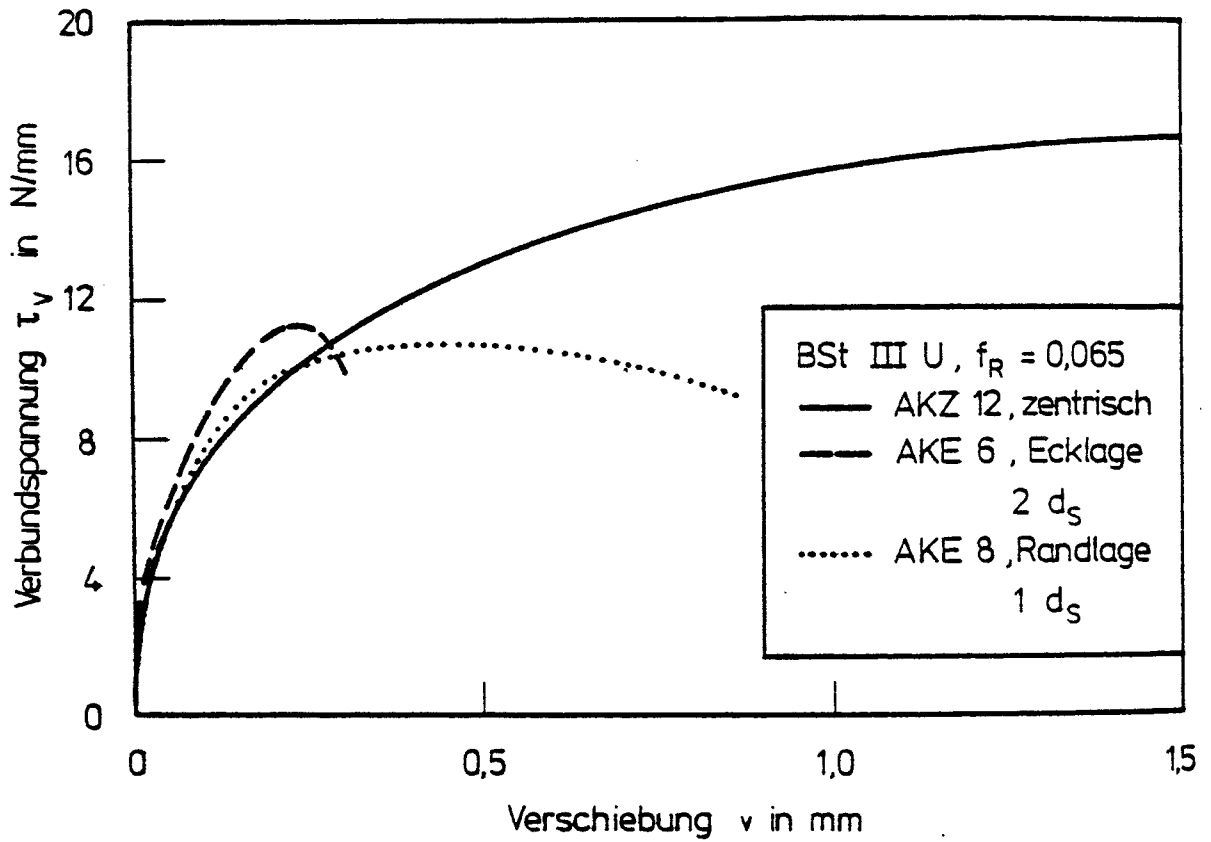


Bild 5.1 Einfluß der Stablage auf den Verlauf der τ_v - v -Beziehung

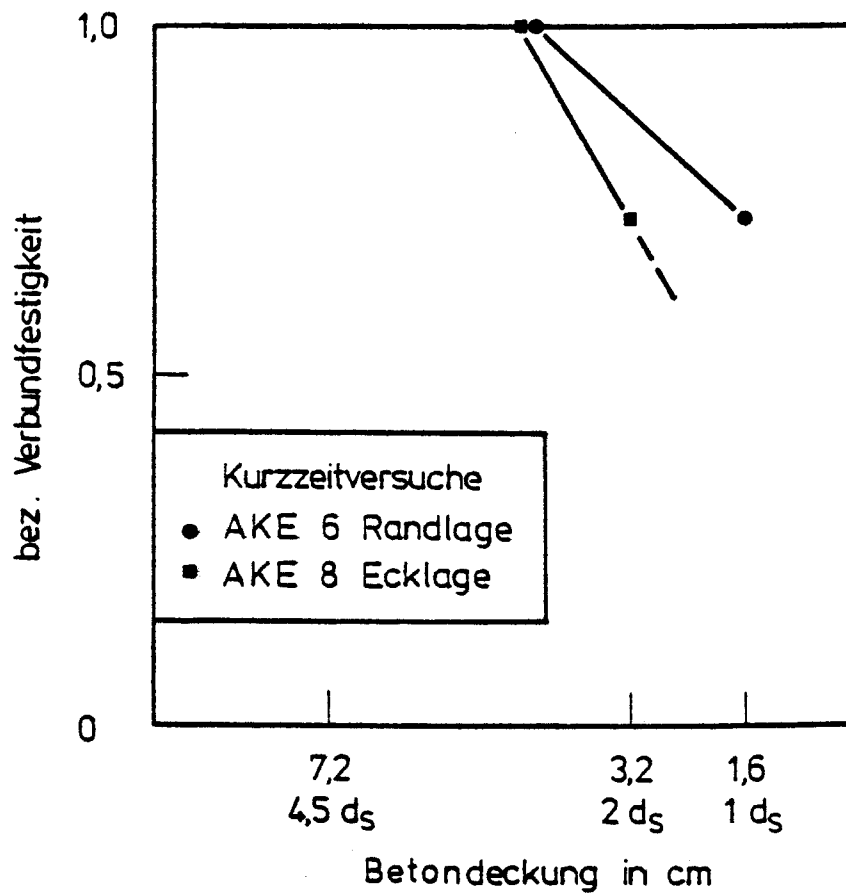


Bild 5.2 Abfall der Verbundfestigkeit bei exzentrischer Stablage im Vergleich zur zentrischen Stablage

6. ERGEBNISSE DER VERBUNDKRIECHVERSUCHE UNTER ZYKLISCHER SCHWELLBEANSPRUCHUNG

Der Verlauf der Verschiebungen unter zyklischer Schwellbeanspruchung entspricht phänomenologisch dem von der Zeit unter Dauerlast abhängigen Verschiebungsverlauf. Postuliert man, daß die in Teil I dieser Arbeit aufgestellte - zumindest für Beanspruchungen $\tau_{vd} \leq 0,5 \tau_{vu}$ gültige - Kriechformel auf das Verbundkriechen unter Schwellbeanspruchung übertragbar ist, ergibt sich analog zu Gleichung 6.1 in Teil I:

$$v_{ges}(N) = v_0 + v_k(N) = v_0 [1 + \varphi_v(N)] \quad (6.1)$$

Die Verbundkriechzahl $\varphi_v(N)$ gibt das Verhältnis der Verschiebungszunahme infolge schwellender Beanspruchung zur spontanen Verschiebung v_0 beim erstmaligen Erreichen der Oberspannung an:

$$\varphi_v(N) = \frac{v_{ges}(N) - v_0}{v_0} \quad (6.2)$$

Dabei wird vorausgesetzt, daß die Beanspruchungen unterhalb der Schwellfestigkeit des Verbundes liegen.

In den Anlagen 6 bis 89 sind die $v(N)$ -N- sowie $\varphi_v(N)$ -N-Verläufe in doppellogarithmischem Maßstab aufgetragen. Sämtliche Darstellungen wurden mit Hilfe einer EDV-Anlage erstellt.

Die Kriechfunktion $\varphi_v(N)$ hängt u. a. von der Schwingbreite der Frequenz, der bezogenen Rippenfläche und der Betonfestigkeit ab. Der Einfluß der genannten Parameter wird in den folgenden Abschnitten anhand der Versuchsergebnisse diskutiert. Um die Versuchswerte vergleichen zu können, wurde die Steigung A der im doppellogarithmischen Maßstab näherungsweise linear verlaufenden $v(N)$ -N-Linien ab $N = 1$ ermittelt.

6.1 Einfluß der Schwingbreite

Bei den Schwellversuchen wurde bei konstanter Oberspannung τ_v^0 die Unterspannung τ_v^u und damit die Schwingbreite $2\tau_a$ variiert. Für eine Oberspannung von $\tau_v^0 = 0,7 \tau_{vu}$ ist in den Anlagen 90 und 91 der Einfluß der Schwingbreite auf die Verschiebung unter Oberspannung für ausgewählte Versuchskörper dargestellt. Die Versuchsergebnisse können für $\tau_v^u = 0,4 \tau_{vu}$ in der gewählten logarithmischen Darstellungsweise gut durch eine Gerade angenähert werden. Eine Verringerung der Unterspannung auf $\tau_v^u = 0,1 \tau_{vu}$ führt zu einer Reduzierung der Lebensdauer. Die $v(N)$ - N -Beziehungen zeigen dann im doppellogarithmischen Maßstab einen von der Geraden abweichenden progressiven Verlauf. Versuchskörper, die bei gleicher Oberspannung $\tau_v^0 = 0,7 \tau_{vu}$ mit einer Unterspannung von $\tau_v^u = 0,25 \tau_{vu}$ beansprucht wurden, erreichen die Grenzlasterpielzahl $N = 10^6$. Der anfangs lineare Verlauf der Verschiebungen geht jedoch ab etwa $N > 10^5$ in einen progressiven Verlauf über (beginnender tertiärer Kriechbereich), d.h. für $2 \cdot 10^6 > N > 10^6$ zeichnet sich ein Versagen ab.

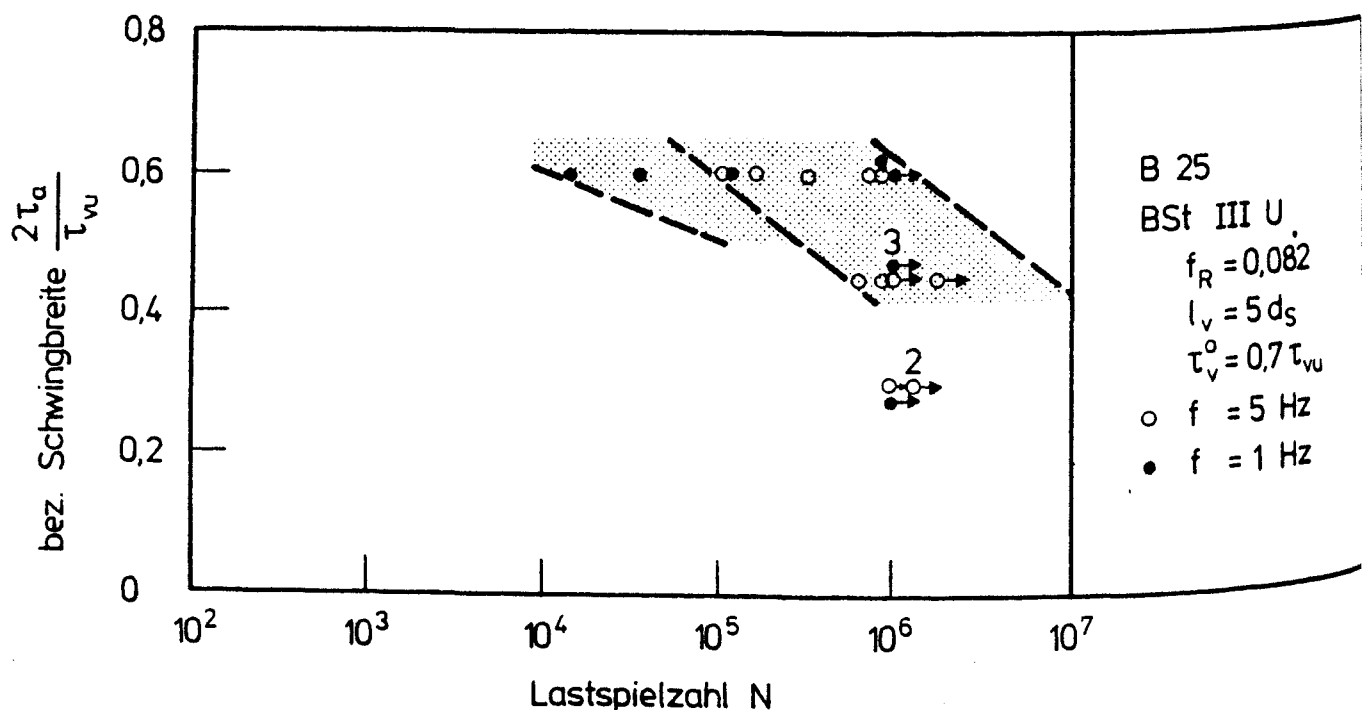


Bild 6.1 Einfluß der bez. Schwingbreite auf die Lebensdauer

In Bild 6.1 ist für die Oberspannung $\tau_V^O = 0,7 \tau_{VU}$ die Bruchlastspielzahl in Abhängigkeit von der bezogenen Schwingbreite aufgetragen. Trat während $N = 10^6$ Lastspiele kein Versagen auf, so ist der Versuchspunkt mit einem Pfeil gekennzeichnet. Da wegen der geringen Anzahl der Versuchswerte die Eintragung einer Wöhlerlinie nicht abgesichert ist, wurde für die Frequenzen $f = 1$ Hz und $F = 5$ Hz der Streubereich gekennzeichnet, in dem die Wöhlerlinie verlaufen muß. Der Übergang der Wöhlerlinie in die Horizontale, deren zugeordnete bez. Schwingbreite auf der Ordinate die Dauerschwellfestigkeit darstellt, ist aufgrund fehlender Versuchswerte und wegen der Begrenzung der Lastspiele auf $N = 10^6$ nicht darstellbar.

Bei einer Oberspannung von $\tau_V^O = 0,8 \tau_{VU}$ und einer Unterspannung von $\tau_V^U = 0,2 \tau_{VU}$ (d. h. $2\tau_a = 0,6 \tau_{VU}$) traten vor Erreichen der Grenzlastspielzahl $N = 10^6$ Dauerbrüche auf. Beanspruchungen von $\tau_V^O = 0,6 \tau_{VU} / \tau_V^U = 0$ sowie $\tau_V^O = 0,8 / \tau_V^U = 0,5 \tau_{VU}$ führten bei einem Teil der Versuchskörper ebenfalls zum frühzeitigen Versagen. Für einen Großteil der Körper, die die vorgegebene Lastspielzahl überstanden, deutet die Steigung der $v(N)$ - N -Werte bei hoher Lastspielzahl auf ein Versagen bei $N > 10^6$ hin. Versuchskörper, die mit einer Oberspannung von $\tau_V^O = 0,6 \tau_{VU}$ und einer Unterspannung von $\tau_V^U = 0,15 \tau_{VU}$ beansprucht wurden, erreichen die Grenzlastspielzahl $N = 10^6$.

Für Beton unter Druckschwellbeanspruchung gilt die bei bestimmter Mittelspannung $N = 2 \cdot 10^6$ mal ertragene Schwingbreite als Dauerschwellfestigkeit. Für die in dieser Untersuchung bewählten Beanspruchungen τ_V^O / τ_{VU} und τ_V^U / τ_{VU} kann die Schwellfestigkeit des Verbundes folgendermaßen eingegrenzt werden:

Bei konstanter Oberspannung $\tau_V^O = 0,7 \tau_{VU}$ wird eine Schwingbreite von $2\tau_a = 0,3 \tau_{VU}$ - wie anhand der $v(N)$ - N -Verläufe postuliert werden kann - sicherlich $N \geq 2 \cdot 10^6$ mal ertragen. Für die Grenzlastspielzahl $N = 10^6$ gilt eine bezogene Schwingbreite von $2\tau_a = 0,45 \tau_{VU}$.

Für eine konstante Oberspannung von $\tau_v^0 = \tau_{vu}$ kann die $N = 2 \cdot 10^6$ mal ertragene Schwingbreite damit zu $0,3 \tau_{vu} \leq 2\tau_a < 0,45 \tau_{vu}$ eingegrenzt werden. Bei konstanter Oberspannung $\tau_v^0 = 0,6 \tau_{vu}$ gilt entsprechend $0,45 \tau_{vu} \leq 2\tau_a < 0,6 \tau_{vu}$.

Bild 6.2 zeigt als durchgezogene Linie das Dauerfestigkeitsschaubild für Beton unter zentrischer Druckschwellbeanspruchung nach Weigler /3/ für $N = 2 \cdot 10^6$. In das Diagramm ist die Zeitschwellfestigkeit des Verbundes ($\tau_v^0 = 0,7 \tau_{vu}$, $\tau_v^u = 0,25 \tau_{vu}$) für $N = 10^6$ eingezeichnet. Man erkennt, daß die Schwellfestigkeit des Verbundes ($N = 2 \cdot 10^6$) etwas geringer ist als die Schwellfestigkeit des Betons unter zentrischer Druckbeanspruchung.

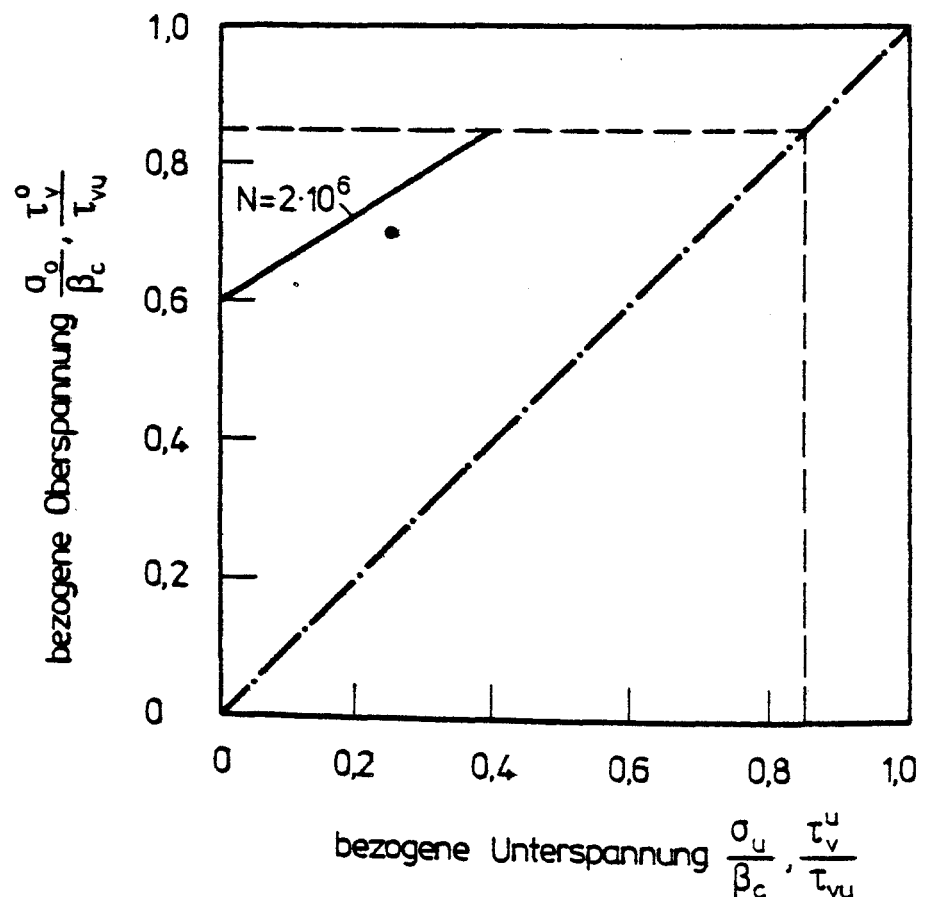


Bild 6.2 Vergleich von Ergebnissen der Verbundschwelluntersuchungen mit dem Dauerfestigkeitsschaubild für Beton unter Druckschwellbeanspruchung nach Weigler /3/

6.2 Einfluß der Frequenz

Bei Untersuchungen des Betonkriechens unter einaxialer Druckschwellbeanspruchung wurde der Einfluß der Frequenz bislang wenig erforscht. Alda /4/ geht bei seiner theoretischen Betrachtung des Schwingkriechens von Beton davon aus, daß sich die Schwingkriechdehnungen unter Ansatz eines Schwingkriechfaktors aus den Kriechdehnungen infolge einer konstant einwirkenden Dauerspannung $\hat{=}$ der Mittelspannung ableiten lassen. Dieser Schwingkriechfaktor η ist u. a. abhängig von der Frequenz. Je kleiner die Frequenz f ist, desto höher ist der Faktor η und damit die Schwingkriechdehnung. Diese Annahme gilt für den von Alda untersuchten Frequenzbereich $f < 10^{-1}$ Hz und insbesondere für rechteckige Spannungszeitfunktionen.

In den Anlagen 92 und 93 ist der Einfluß der Frequenz auf die Verschiebungszunahme unter Schwellbeanspruchung für einige ausgewählte Versuchskörper zusammengestellt. Aus den Versuchsergebnissen der Serie AKZ10 läßt sich für Spannungen $\tau_V^0 = 0,7 \tau_{vu}$ und $\tau_V^u = 0,1 \tau_{vu}$ ein Einfluß der Frequenz ableiten. Versuchskörper, die mit niedriger Frequenz $f = 1$ Hz gefahren wurden, versagten bei einer geringeren Lastspielzahl als solche, die mit der hohen Frequenz von $f = 5$ Hz geprüft wurden. Diese Aussage kann durch die Versuchsergebnisse der Serie AKZ17 nicht bestätigt werden. Hier treten bei den Versuchskörpern, die mit $f = 5$ Hz belastet wurden, bei geringeren Lastspielzahlen Verbundbrüche auf.

Für Beanspruchungen $\tau_V^0 = 0,7 \tau_{vu}$ und $\tau_V^u = 0,4 \tau_{vu}$ sind für die Serien AKZ10 und AKZ17 die Steigungen der $v(N)$ - N -Verläufe über der Frequenz in Bild 6.3 aufgetragen. Vergleicht man die gemittelten A-Faktoren, so ist mit zunehmender Frequenz eine Abnahme der Steigung der Verschiebungskurven zu verzeichnen.

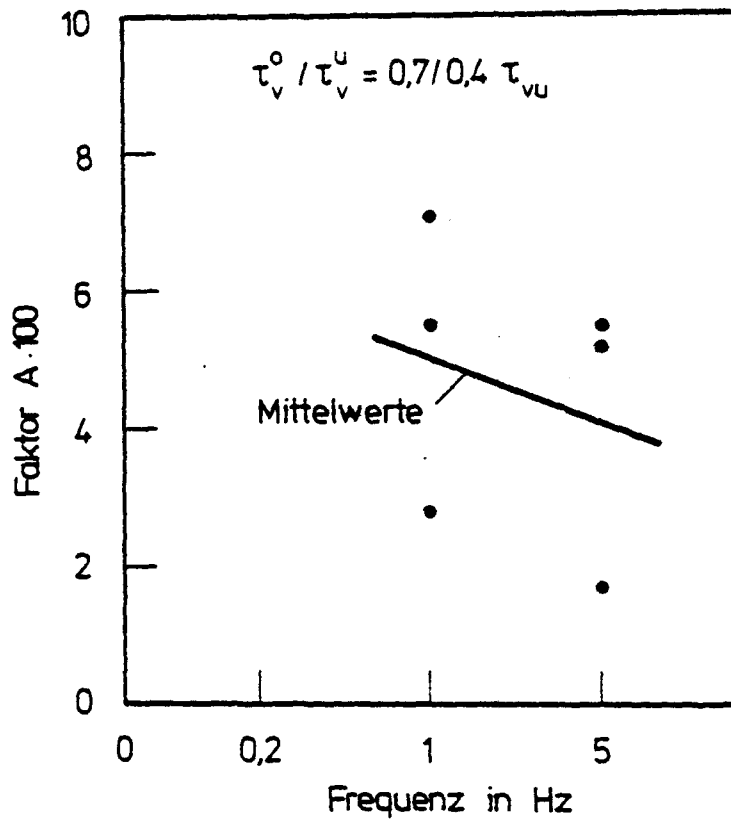


Bild 6.3 Einfluß der Frequenz auf die Steigung A der $v(N)$ -N-Kurven bei einer Überspannung von $\tau_v^o = 0,7 \tau_{vu}$ und einer Unterspannung von $\tau_v^u = 0,4 \tau_{vu}$

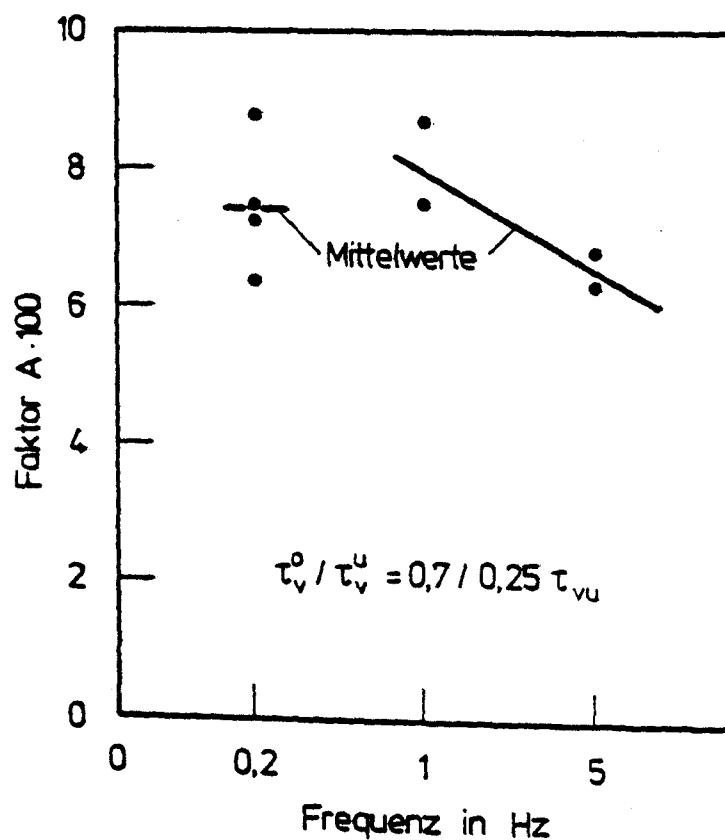


Bild 6.4 Einfluß der Frequenz auf die Steigung A der $v(N)$ -N-Kurven bei einer Überspannung von $\tau_v^o = 0,7 \tau_{vu}$ und einer Unterspannung von $\tau_v^u = 0,25 \tau_{vu}$

Für Beanspruchungen $\tau_V^0 = 0,7 \tau_{vu}$ und $\tau_V^u = 0,25 \tau_{vu}$, Serie AKZ12, ist in Bild 6.4 die Abhängigkeit der Steigung A von der Frequenz für $f = 1 \text{ Hz}$ und $f = 5 \text{ Hz}$ ebenfalls eindeutig ablesbar. Bei Betrachtung der Steigungen für Versuchskörper, die mit $f = 0,2 \text{ Hz}$ beansprucht wurden, ist zu berücksichtigen, daß die Versuche bereits bei relativ geringen Lastspielzahlen $N \leq 100\,000$ abgebrochen wurden.

Eine Unterspannung von $\tau_V^u = 0,2 \tau_{vu}$ führt bei einer Oberspannung von $\tau_V^0 = 0,8 \tau_{vu}$ stets zum Verbundversagen. Eine Erhöhung der Unterspannung auf $\tau_V^u = 0,5 \tau_{vu}$ ergibt bei Serie AKZ20 für $f = 1 \text{ Hz}$ Verbundbrüche, für $f = 5 \text{ Hz}$ "Durchläufer". Die Steigung A der $v(N)$ -N-Verläufe für $f = 5 \text{ Hz}$ liegt im Mittel bei $A = 0,0352$. Bei Serie AKZ21 wurde für beide Frequenzen $f = 1 \text{ Hz}$ und $f = 5 \text{ Hz}$ die Grenzlastspielzahl $N = 10^6$ erreicht. Die mittlere Steigung A der $v(N)$ -N-Linien variierte nur geringfügig ($A = 0,0769$ für $f = 5 \text{ Hz}$, $A = 0,0709$ für $f = 1 \text{ Hz}$).

Für Beanspruchungen $\tau_V^0 = 0,6 \tau_{vu}$ und $\tau_V^u = 0$ widersprechen sich die Versuchsergebnisse. Während bei der Serie AKZ20 Proben, die mit 5 Hz gefahren wurden, Verbundbrüche aufweisen, erreichen die Proben der Serien AKZ21 und AKZ24 die vorgegebene Grenzlastspielzahl $N = 10^6$. Bei den mit $f = 1 \text{ Hz}$ beanspruchten Proben versagten die Körper der Serie AKZ21 durch Verbund- bzw. Stahlversagen, während die Ausziehkörper der Serie AKZ20 die zyklische Beanspruchung überstanden.

6.3 Einfluß der Betongüte

Aus Kurzzeitversuchen ist bekannt, daß für Betonrippenstähle im Bereich mäßiger Verschiebungen ein linearer Zusammenhang zwischen der Verbundspannung τ_V und der Betondruckfestigkeit β_w vorausgesetzt werden kann.

Die in Teil I, Abschnitt 6.2 beschriebenen Verbunduntersuchungen unter konstanter Dauerlast ergaben, daß ein nennenswerter Einfluß der Betondruckfestigkeit auf die zeitabhängige Verschiebungszunahme nicht besteht.

Um den Einfluß der Betongüte bei den hier beschriebenen Schwelluntersuchungen abzuschätzen, können die Versuchsergebnisse der Serien AKZ24 und AKZ21 verglichen werden. Wie aus Anlage 94 ersichtlich, ist ein wesentlicher Einfluß der Betondruckfestigkeit nicht erkennbar. Auch ein Vergleich der Steigung A der $v(N)$ - N -Beziehung für die Proben AKZ 21.20 ($A = 0,0606$) und AKZ 24.05 ($A = 0,0608$) läßt einen Einfluß der Betongüte nicht erkennen.

6.4 Einfluß des Belastungsalters

Die Schwellversuche wurden in der Regel zu einem Zeitpunkt ($t_0 = 100$ Tage) begonnen, bei dem Einflüsse aus der Festigkeitsentwicklung ausgeschlossen waren. Um den Einfluß des Belastungsalters zu erfassen, wurden die Versuchskörper der Serie AKZ25 bzw. 3 Versuchskörper der Serie AKZ19 in jungem Alter belastet. Um einen Vergleich mit ausgehärteten Proben zu erhalten, können die Ergebnisse der Serie AKZ12 herangezogen werden. In Anlage 95 sind die Festigkeits- und Belastungswerte zusammengestellt.

Die Versuchskörper der Serie AKZ25, die zu verschiedenen Belastungsaltern t_0 geprüft wurden, zeigen eine große Streuung in den Versuchsergebnissen. Während z. B. die Probe 6 die vorgegebene Grenzlastspielzahl erreichte, versagte die Probe 5 bereits nach $N = 5150$ Lastspielen.

Ein Vergleich der $v(N)$ - N -Kurven von Proben der Serien AKZ25 und AKZ12, die $N = 10^6$ Lastspiele überstanden, zeigt, daß bei den in jungem Alter belasteten Ausziehkörpern im Anfangsbereich ein stei-

ler Verlauf zu verzeichnen ist, der ab einer Lastspielzahl von etwa $N = 10^4$ abflacht. Die in hohem Alter belasteten Proben weisen demgegenüber einen annähernd stetigen Verlauf der $v(N)$ -N-Werte auf (Anlage 96). Die $\varphi_v(N)$ -Werte der jungen Proben ergeben im doppellogarithmischen Maßstab im Anfangsbereich bis $N = 10^4$ eine nicht-lineare Beziehung, während die $\varphi_v(N)$ -N-Kurven für die Serie AKZ 12 - bei Nichtberücksichtigung des Anfangswertes - einen linearen Verlauf zeigen (Anlage-97). Diese zuvor beschriebenen Beobachtungen wurden auch bei den in Teil I, Abschnitt 6.3 erläuterten Verbundkriechversuchen unter konstanter Dauerlast gemacht.

Unter der Voraussetzung, daß die Betondruckfestigkeit keinen Einfluß auf das Verbundkriechen unter Schwellbeanspruchung ausübt, lassen sich die Ergebnisse der Serie AKZ19 mit denen der Serie AKZ12 vergleichen. Die hier vorliegenden Ergebnisse widersprechen teilweise den zuvor geschilderten Beobachtungen. So ist die bei den jungen Proben der Serie AKZ25 festgestellte große Verschiebungszunahme für $N \leq 10^4$ nicht erkennbar, die $v(N)$ -Werte zeigen vielmehr einen stetigen Verlauf (Anlage 98). Die Nichtlinearität der Kriechzahlen $\varphi_v(N)$ wurde für die jungen Proben der Serie AKZ19 jedoch ebenfalls ermittelt (Anlage 99).

6.5 Einfluß der bezogenen Rippenfläche

Aus Kurzzeit-Ausziehversuchen von Martin und Noakowski /5/ ist eine lineare Abhängigkeit zwischen der auf die Betondruckfestigkeit bezogenen Verbundspannung und der bezogenen Rippenfläche ableitbar.

Bei den in Teil I, Abschnitt 6.5 beschriebenen Versuchen unter konstanter Verbunddauerspannung ist eine lineare Abhängigkeit der Steigung A der $v(t)$ -t-Beziehungen von der bezogenen Rippenfläche f_R feststellbar.

Der Einfluß der bezogenen Rippenfläche auf das Verbundverhalten unter Schwellbeanspruchung kann anhand der Versuchsergebnisse der Serien AKZ12 und AKZ17 diskutiert werden.

Ein Vergleich der Anfangsverschiebungen v_0 bei den Serien AKZ12 und AKZ17 zeigt, daß die v_0 -Werte bei Serie AKZ12 ($f_R = 0,065$) etwas höher sind als bei Serie AKZ17 ($f_R = 0,082$).

Trägt man für die Spannungen $\tau_v^0 = 0,7 \tau_{vu}$ und $\tau_v^u = 0,25 \tau_{vu}$ die Steigungen A der $v(N)$ -N-Kurven über der bezogenen Rippenfläche f_R auf (siehe Bild 6.5), so zeichnet sich ein deutlicher Einfluß von f_R ab. Die $v(N)$ -N-Linien verlaufen mit steigender bezogener Rippenfläche flacher.

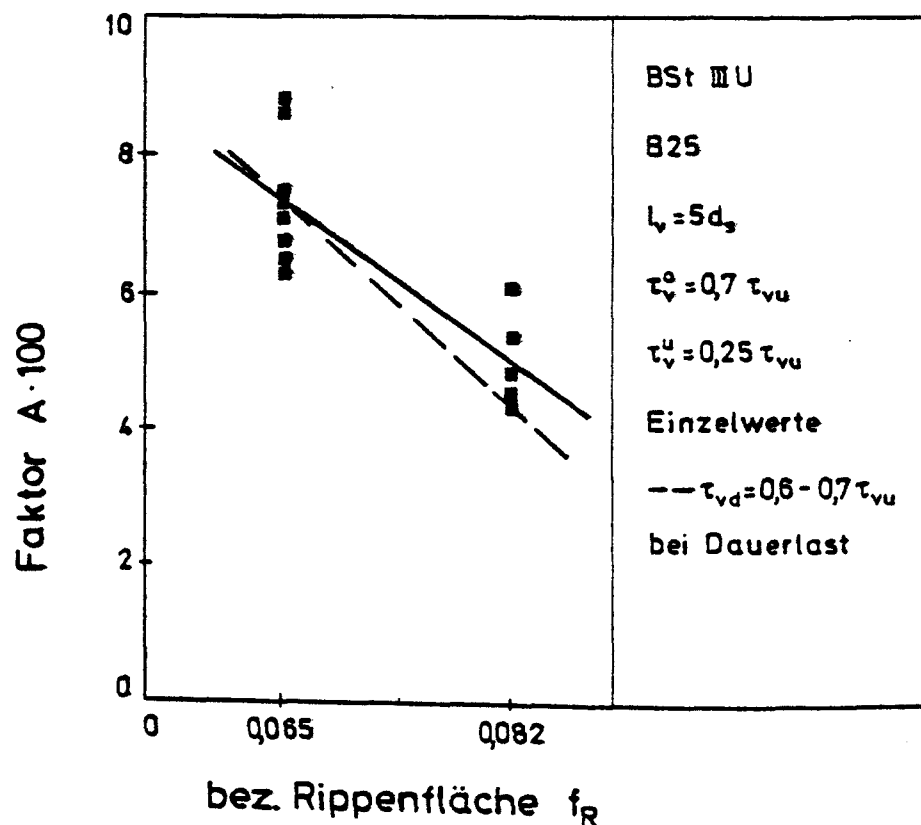


Bild 6.5 Einfluß der bezogenen Rippenfläche auf die Steigung A der $v(N)$ -N- bzw. $v(t)$ -t-Kurven

Ein Vergleich der mit den Versuchsergebnissen berechneten $\varphi_v(N)$ -Werte ergibt für die Serie AKZ12 ($f_R = 0,065$) maximale Werte von $\varphi_v(N = 10^6) = 2,0$ gegenüber $\varphi_v(N = 10^6) = 1,4$ für die Serie AKZ17 ($f_R = 0,082$). In den Anlagen 100 und 101 ist der Einfluß der bezogenen Rippenfläche auf den $v(N)$ -N-Verlauf sowie die $\varphi_v(N)$ -Werte für ausgewählte Versuchskörper dargestellt.

Um den Einfluß der bezogenen Rippenfläche festzustellen, können auch die Versuchsergebnisse der Serien AKZ20 und AKZ24 herangezogen werden. Für die Spannungen $\tau_v^0 = 0,8 \tau_{vu}$ und $\tau_v^u = 0,5 \tau_{vu}$ weisen die $v(N)$ -N-Beziehungen der Probe AKZ 24.05 mit der niedrigen bezogenen Rippenfläche ($f_R = 0,065$) einen wesentlich steileren Verlauf auf als die $v(N)$ -N-Verläufe der Proben AKZ 20.07 und AKZ 20.08 mit der hohen bezogenen Rippenfläche ($f_R = 0,082$). Die Steigung A liegt bei 0,0608 für die Serie AKZ 24 bzw. 0,035 für die Serie AKZ20.

6.6 Einfluß der Betondeckung

Der Einfluß der Betondeckung wurde an den exzentrischen Ausziehkörpern der Serien AKE6 und AKE8 studiert. Versuche mit den Versuchskörpern der Serien AKE9 und AKE10 stehen noch aus. Als Vergleich mit zentrisch bewehrten Proben können die Versuchsergebnisse der Serie AKZ12 herangezogen werden.

Wie bereits in Abschnitt 5 beschrieben, versagen die exzentrischen Ausziehkörper schlagartig durch Sprengbruch. An Proben, die die Schwellbeanspruchung ($N = 10^6$) überstanden, waren augenscheinlich keine Risse festzustellen.

Aus Bild 5.2, Abschnitt 5 ist zu entnehmen, daß das "Verschiebungspotential" bis zum Bruch bei den Versuchskörpern mit exzentrischer Stablage wesentlich geringer ist als bei Proben mit zentrischer Stablage. Dementsprechend sind die lastabhängigen Anfangsverschie-

bungen bzw. die Kriechverschiebungen bei den Proben der Serien AKE5 und AKE8 ebenfalls erheblich kleiner als bei den zentrisch bewehrten Ausziehkörpern.

Beanspruchungen $\tau_v^0 = 0,7 \tau_{vu} / \tau_v^u = 0,4 \tau_{vu}$ führen bei den bislang untersuchten Stablagen nicht zum Versagen. Der Probekörper AKE8.02, $2d_s$ ist als "Ausrutscher" anzusehen. Die Steigung A der $v(N)$ -N-Kurven im doppellogarithmischen Maßstab entspricht derjenigen bei den zentrischen Versuchen.

Die Schwellfestigkeit des Verbundes $\tau_v(N = 10^6) = 0,475 \tau_{vu} \pm 0,225 \tau_{vu}$ der zentrischen Proben gilt für die exzentrischen Proben nicht. Beanspruchungen $\tau_v^0 = 0,7 \tau_{vu} / \tau_v^u = 0,25 \tau_{vu}$ führen bereits bei $N < 10^6$ zum Sprengbruch.

Die bei den zentrischen Versuchen beobachtete größere Verschiebungszunahme $v_k(N)$ bei niedriger Frequenz $f = 1 \text{ Hz}$ im Vergleich zu $f = 5 \text{ Hz}$ ist auch bei den exzentrischen Proben festzustellen.

Weitere Aussagen über den Einfluß der Betondeckung auf das Verbundkriechverhalten unter Schwellbeanspruchung sind erst nach Beendigung der noch ausstehenden Versuche der Serien AKE9 und AKE10 möglich.

7. VERHALTEN DER VERSUCHSKÖRPER NACH ZYKLISCHER SCHWELLBEANSPRUCHUNG

Alle Versuchskörper, die die Schwellbeanspruchung überstanden, wurden anschließend statisch bis zum Bruch belastet. Die τ_v -v-Beziehungen dieser vorbelasteten Proben sind auszugsweise in den Anlagen 102 bis 104 zusammengestellt.

In Bild 7.1 sind die τ_v -v-Beziehungen vorbelasteter Proben beispielhaft aufgetragen. Aus der Darstellung geht hervor, daß der τ_v -v-Verlauf der vorbelasteten Versuchskörper durch einen anfänglichen steilen Anstieg gekennzeichnet ist. Bereits bei einer Stabendverschiebung von rd. $v = 0,1$ mm werden Verbundspannungen erreicht, die etwa das Zweifache unvorbelasteter Proben betragen. Erst kurz vor Erreichen der Verbundfestigkeit treten deutliche Verschiebungen auf. Die Verschiebungszunahme infolge Schwellbelastung ist somit plastischer Natur.

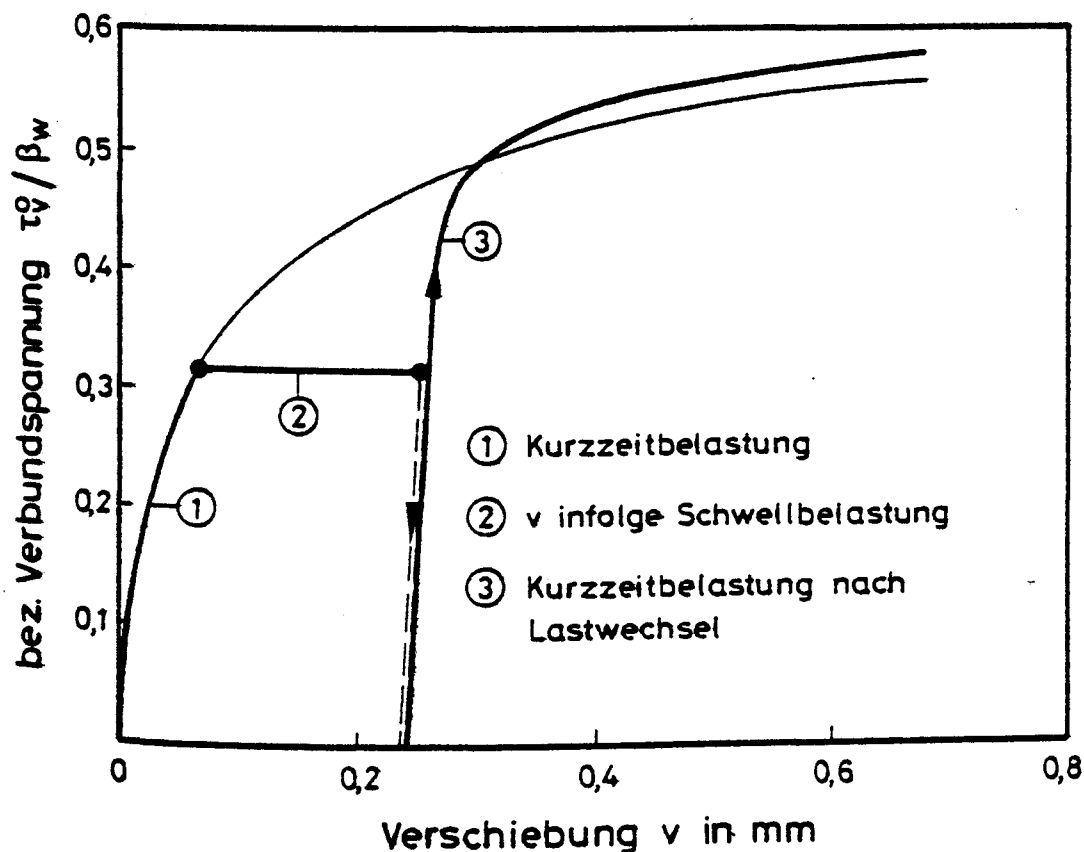


Bild 7.1 Schematische Darstellung von τ_v -v-Kurven unvorbelasteter bzw. durch eine Schwellbeanspruchung vorbelasteter Ausziehkörper

Ein Vergleich der Verbundfestigkeiten vorbelasteter und unvorbelasteter Versuchskörper läßt einen ungünstigen Einfluß einer Schwellbelastung nicht erkennen. Die Verbundfestigkeiten der einer schwel-lenden Beanspruchung unterworfenen Proben lagen bei etwa 87 bis 122 % der in den Kurzzeitversuchen ermittelten mittleren Verbundfestigkeit $\tau_{\text{vum}}(t_0)$ (Anlage 105). Der geringe Abfall der Verbundfestigkeit $\tau_{\text{vum}}(N = 10^6)$ gegenüber $\tau_{\text{vum}}(t_0)$ tritt nur bei den ex-zentrischen Proben auf.

8. ZUSAMMENFASSUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE

Das Verbundkriechverhalten unter Schwellbeanspruchung wurde an einfachen zylindrischen Ausziehkörpern mit zentrisch einbetoniertem Bewehrungsstab sowie an quadratischen Ausziehkörpern mit exzentrischem Stab studiert. Bei diesen Versuchen wurden bei konstanter Oberspannung τ_v^O die Unterspannung τ_v^U und damit die Schwingbreite, weiterhin die Frequenz, die Betongüte, die Einbettungslänge sowie das Belastungsalter variiert. Die Untersuchungsergebnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

1. Die Höhe der Unterspannung übt bei konstanter Oberspannung einen Einfluß auf die Lebensdauer sowie auf den Verlauf der $v(N)$ -Kurven aus. Die bis zum Versagen ertragbare Lastspielzahl nimmt bei konstanter Oberspannung mit sinkender Unterspannung ab. Für Beanspruchungen unterhalb der Schwellfestigkeit des Verbundes ist der Einfluß der Schwingbreite von untergeordneter Bedeutung.
2. Die Auftragung der Versuchsergebnisse in einem Dauerfestigkeits-schaubild zeigt, daß die Schwellfestigkeit des Verbundes etwas niedriger als die für unbewehrten Beton auf zentrischen Druck ausfällt.
3. Der Einfluß der Frequenz ist mit den hier vorliegenden Versuchsergebnissen nicht eindeutig feststellbar. Es scheint jedoch bei niedriger Frequenz eine größere Zunahme der Verschiebungen $v(N)$ vorzuliegen als bei hoher Frequenz. In der Regel versagten Versuchskörper, die mit niedriger Frequenz gefahren wurden, bei einer geringeren Lastspielzahl als Versuchskörper, die mit hoher Frequenz belastet wurden. Eine zyklische Belastung mit $f = 1 \text{ Hz}$ und $N_{\max} = 10^6$ Lastspielen entspricht einer Belastungsdauer von $T \approx 11,6$ Tagen, bei einer Frequenz von $f = 5 \text{ Hz}$ dauert ein Versuch demgegenüber $T = 2,3$ Tage. Da bei einer zyklischen Belastung mit niedriger Frequenz zeitabhängige Einflüsse die

Verschiebungszunahme infolge Lastwechsel überlagern, ist auch theoretisch bei niedriger Frequenz eine größere Zunahme der Verschiebungen zu erwarten als bei hoher Frequenz.

4. Wie bei Kurzzeitversuchen und bei Kriechversuchen unter konstanter Dauerbeanspruchung, ist auch bei Schwellversuchen ein deutlicher Einfluß der Profilierung, ausgedrückt durch die bezogene Rippenfläche f_R , festzustellen. Die spontane Anfangsverschiebung v_0 bei Erreichen der Oberspannung τ_V^0 ist für Bewehrungsstähle mit niedriger bezogener Rippenfläche größer als für Stäbe mit hohem f_R -Wert. Die Steigung A der im doppellogarithmischen Maßstab in erster Näherung geradlinig verlaufenden $v(N)$ -Werte nimmt mit steigender bezogener Rippenfläche f_R linear ab.
5. Schwellversuche an jungem Beton ergaben, daß die $v(N)$ - N -Kurven im Anfangsbereich steil verlaufen und ab einer Lastspielzahl von etwa $N = 10^4$ abflachen. Im Gegensatz zu den $\varphi_V(N)$ -Werten älterer Proben, die in doppellogarithmischer Darstellungsweise näherungsweise linear verlaufen, weisen die $\varphi_V(N)$ -Werte von Versuchskörpern, die in einem Alter $t_0 \leq 28$ Tage belastet wurden, im Anfangsbereich bis etwa $N = 10^6$ Lastspiele einen nichtlinearen Verlauf auf.
6. Die Betongüte übt - ebenso wie bei konstanter Dauerbeanspruchung - keinen Einfluß auf das Verbundkriechverhalten unter Schwellbelastung aus.
7. Um den Einfluß der Betondeckung zu studieren, wurden exzentrische Ausziehkörper untersucht, bei denen der Bewehrungsstab mit einem Randabstand von $1 d_s$ auf der Mittelachse und mit einem Abstand von $2 d_s$ auf der Diagonalen angeordnet war. Kurzzeitversuche an den exzentrischen Probekörpern ergaben, daß sich mit abnehmender Betondeckung die Verbundfestigkeit und die Verschiebung verringern. Die Versagensart wechselt vom Gleitbruch zum Sprengbruch.

Die Schwellfestigkeit des Verbundes $\tau_v(N = 10^6) = 0,475 \tau_{vu} \pm 0,225 \tau_{vu}$ gilt für die exzentrischen Proben nicht. Beanspruchungen $\tau_v^0 = 0,7 \tau_{vu} / \tau_v^u = 0,25 \tau_{vu}$ führen bereits bei $N < 10^6$ zum Sprengbruch. Weitere Aussagen über den Einfluß der Betondeckung auf das Verbundkriechverhalten unter Schwellbeanspruchung sind erst nach Beendigung der noch ausstehenden Versuche möglich.

8. Die durch eine Schwellbeanspruchung vorbelasteten Versuchskörper erreichen bei statischer Kurzzeitprüfung Verbundfestigkeiten, die bei etwa 87 % bis 122 % der mittleren Verbundfestigkeiten der jungfräulichen Proben liegen.

9. NACHRECHNUNG VON VERSUCHSERGEBNISSEN MIT BEKANNTEN KRIECHANSATZEN

Der von der Lastspielzahl bzw. von der Zeit unter Dauerlast abhängige Verschiebungsverlauf entspricht phänomenologisch den bekannten Gesetzen des Betondruckkriechens. Unter der Annahme der Übertragbarkeit der Kriechformel für das Betondruckkriechen auf das Verbundkriechen ergibt sich die Gesamtverschiebung unter Zugschwellbeanspruchung zu:

$$v_{\text{ges}}(N) = v_0 + v_k(N) = v_0 [1 + \varphi_v(N)] \quad (10.1)$$

Dabei wird vorausgesetzt, daß die Beanspruchungen unterhalb der Dauerschwingfestigkeit des Verbundes liegen.

Die Verbundkriechzahl $\varphi_v(N)$ gibt das Verhältnis der Verschiebungszunahme infolge schwellender Beanspruchung zur spontanen Verschiebung v_0 beim erstmaligen Erreichen der Oberspannung an:

$$\varphi_v(N) = \frac{v_{\text{ges}}(N) - v_0}{v_0} \quad (10.2)$$

Die Gültigkeit von Gleichung 10.1 setzt voraus, daß die Kriechzahl $\varphi_v(N)$ von der Anfangsverschiebung v_0 unabhängig ist. Da die $v(N)$ - N -Verläufe für Versuchskörper, die während der Schwellbeanspruchung nicht versagten, im doppellogarithmischen Maßstab für verschiedene Anfangsverschiebungen durch parallel zueinander verlaufende Geraden angenähert werden können, kann unabhängig von v_0 dieselbe Kriechfunktion $\varphi_v(N)$ zur Berechnung der lastspielabhängigen Verschiebungen angesetzt und die Gültigkeit von Gleichung 10.1 angenommen werden.

Rehm und Eligehausen /2/ gelangen analog zu Franke's Ansatz (siehe Teil I, Gleichung 9.3) zu nachstehender Kriechfunktion:

$$\varphi_v(N) = (1 + N)^A - 1 \quad (10.3)$$

Der Faktor A beträgt für Beanspruchungen unterhalb der Schwellfestigkeit des Verbundes für die Versuchsbedingungen von Rehm und Eligehausen $A = 0,107$ und wird durch die variierten Parameter: Betongüte, Stabdurchmesser unwesentlich beeinflusst. Für $N = 10^6$ Lastspiele berechnet sich $\varphi_v(N = 10^6)$ damit zu 3,4.

Für die hier beschriebenen Versuche ist die mittlere Steigung A der $v(N)$ -N-Beziehungen in Abhängigkeit von den untersuchten Parametern in nachstehender Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 9.1: Mittlere Steigung A der $v(N)$ -N-Beziehungen in Abhängigkeit von den Versuchsparametern ($t_0 \geq 100$ d)

$\frac{\tau_v^0}{\tau_{vu}} / \frac{\tau_v^u}{\tau_{vu}}$ [-]	f_R [-]	Frequenz [Hertz]	A [-]
0,7/0,4	0,082	5 Hz	0,041
0,7/0,4	0,082	1 Hz	0,051
0,7/0,25	0,082	5 Hz	0,057
0,7/0,25	0,082	1 Hz	0,050
0,7/0,25	0,065	5 Hz	0,066
0,7/0,25	0,065	1 Hz	0,080

Wie aus Tabelle 9.1 hervorgeht, sind mit den hier vorliegenden Versuchsergebnissen geringere A-Faktoren zu ermitteln als der von Rehm und Eligehausen angegebene Wert. Die maximalen $\varphi_v(N = 10^6)$ -Werte lassen sich damit zu etwa 2.02 berechnen. Kriechzahlen $\varphi_v(N = 10^6) > 3,0$ ergeben sich nur, wenn Kriechbrüche auftreten, d. h. bei Beanspruchungen oberhalb der Schwellfestigkeit des Verbundes.

In den Anlagen 106 und 107 werden mit Ansatz 10.3 berechnete Kriechzahlen mit den Versuchsergebnissen verglichen. Zur Ermittlung des Faktors A wurden alle Meßwerte des jeweiligen Einzelversuchs angesetzt.

Wie aus den Darstellungen hervorgeht, erhält man im allgemeinen für geringe Lastwechsel etwas zu kleine Kriechzahlen, für hohe Lastspielzahlen ist die Anpassung an die Versuchswerte ausreichend gut.

10. VERGLEICH DES VERBUNDKRIECHVERHALTENS UNTER SCHWELLBEANSPRUCHUNG UND UNTER KONSTANTER DAUERLAST

Da für die Dauerstand- und Schwellversuche bei gleicher Darstellungsweise eine vergleichbare Verschiebungszunahme festzustellen ist, kann angenommen werden, daß das Verschiebungsverhalten unter einer langzeitigen statischen und einer schwellenden Beanspruchung miteinander korrespondiert.

Eine Schwellbeanspruchung ist mit einer Dauerstandbelastung hinsichtlich Belastungszeit durch die Beziehung $t = N/f$ verknüpft. Vergleicht man die Kriechzahlen $\varphi_v(N = 10^6)$ mit den entsprechenden Kriechzahlen $\varphi_v(t = 2,3 \text{ Tage})$ bzw. $\varphi_v(t = 11,6 \text{ Tage})$ für die Verhältnisse $\tau_v^0 = \tau_{vd}$, so ist festzustellen, daß eine Schwelllast höhere Kriechverformungen erzeugt als eine Dauerbeanspruchung. Ein Schwellversuch kann damit als Zeitraffer für einen Dauerstandversuch angesehen werden.

Aus Anlage 108 ist ersichtlich, daß der $v(t)$ - t -Verlauf für $\tau_{vd} = 0,7 \tau_{vu}$ gut mit dem $v(N)$ - N -Verlauf für $\tau_v^0 = 0,7 \tau_{vu}$, $\tau_v^u = 0,4 \tau_{vu}$, $f = 1 \text{ Hz}$ übereinstimmt. Für gleiche Ober- und Unterspannungen ergeben sich bei $f = 5 \text{ Hz}$ im Vergleich zu einer Dauerstandbeanspruchung kleinere φ_v -Werte.

Nach den Versuchsergebnissen ergeben sich für $N = 250\,000$ und $T = 1400 \text{ h}$ etwa gleiche Kriechzahlen. Das heißt, eine Schwellbelastung mit $\tau_v^0 = 0,7 \tau_{vu}$, $\tau_v^u = 0,4 \tau_{vu}$ und $f = 1 \text{ Hz}$ entspricht für $N = 250\,000$ Lastwechsel einer Dauerstandbeanspruchung mit $\tau_{vd} = \tau_v^0 = 0,7 \tau_{vu}$ über einen Zeitraum von etwa 2 Monaten. Unter Ansatz der Kriechformeln 9.3/Teil I und 10.3/Teil II ergeben sich die gleichen Kriechzahlen für $N = 250\,000$ Lastspiele und $t \approx 34 \text{ Monate}$. Durch die beiden Beziehungen wird die Korrelation zwischen Dauerstandbeanspruchung und Schwellbelastung also nicht erreicht.

Zusammenfassend liefert der Vergleich der Versuchsergebnisse die Erkenntnis, daß das Verbundkriechen infolge periodischer Spannungen grundsätzlich mit dem Verbundkriechen infolge einer konstanten Dauerspannung korrespondiert. Die Akkumulation der Verschiebungen infolge schwingender Beanspruchung kann aus den Kriechverformungen infolge $\tau_{vd} = \text{konstant}$ durch Modifikation mit einem Faktor η ermittelt werden. Dieser Schwingkriechfaktor η stellt das Verhältnis

$$\eta = \frac{v_K(N, f, \tau_a)}{v_K(t, \tau_{vd} = \tau_v^0 = \text{Konst.})} \quad (10.1)$$

dar.

Setzt man η für $\tau_v^0 = 0,7 \tau_{vu}$, $\tau_v^u = 0,4 \tau_{vu}$, $f = 1 \text{ Hz}$, $N = 250\,000$ Lastspiele und $\tau_{vd} = \tau_v^0$, $T = 2 \text{ Monate}$ zu 1,0, ergeben sich Schwingkriechfaktoren $\eta > 1$, wenn

- die Schwingbreite τ_a größer ist
- die Frequenz niedrig ist ($f < 1 \text{ Hz}$)
- die Lastspielzahl hoch ist
- die Belastungsdauer klein ist.

11. OFFENE FRAGEN

Nach Abschluß der noch ausstehenden Versuche ist der Einfluß der wesentlichen das Verbundkriechen unter Zugschwellbeanspruchung bestimmenden Parameter abgeklärt. Die Schwellfestigkeit des Verbundes für verschiedene Mittelspannungen τ_{vm} konnte durch die Versuchsserien nur eingegrenzt werden.

Ziel der weiteren Arbeit ist es, ein Verbundkriechgesetz für das Verhalten unter zyklischer Beanspruchung zu entwickeln. Da ein Kriechgesetz in der Lage sein sollte, die zeitabhängige Antwort auf verschiedene Beanspruchungsarten, z. B. konstante Dauerlast und zyklische Beanspruchung, zu liefern, soll eine von der "Erregungsart" unabhängige Kriechfunktion aufgestellt werden. Die Verknüpfung zwischen konstanter und periodisch wirkender Spannungs-Zeit-Geschichte ist z. B. durch einen Schwingkriechfaktor denkbar, der die Verformungsakkumulation infolge schwingender Beanspruchung beschreibt.

Literaturverzeichnis

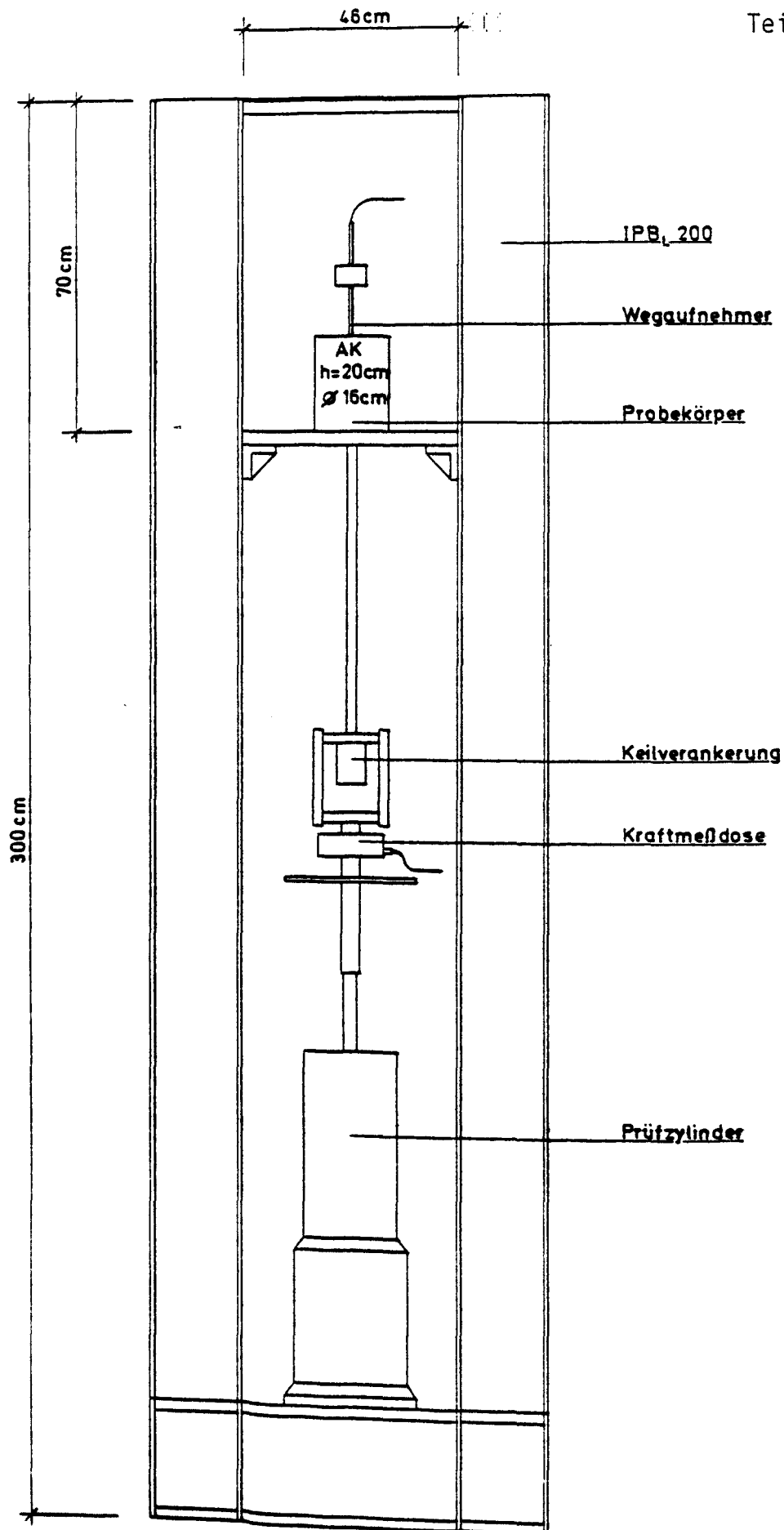
- /1/ Sager, H.: Zum Einfluß hoher Temperaturen auf das Verbundverhalten von einbetonierten Bewehrungsstäben.
Dissertation, TU Braunschweig, 1984
- /2/ Rehm, G., Eligehausen, R.: Einfluß einer nicht ruhenden Belastung auf das Verbundverhalten von Rippenstählen.
Betonwerk + Fertigteiltechnik, Heft 6, 1977
- /3/ Weigler, H.: Beton bei häufig wiederholter Beanspruchung.
Beton, Heft 5, 1981
- /4/ Alda, W.: Zum Schwindkriechen von Beton.
Dissertation, TU Braunschweig, 1978
- /5/ Martin, H., Noakowski, P.: Verbundverhalten von Betonstählen.
Untersuchung auf der Grundlage von Ausziehversuchen.
DAfStb, Heft 319, 1981

TEIL II

A n l a g e n

Zusammenstellung der Versuchsvariablen bei den Zugschwellversuchen

Betonier- serie	Stahlgüte f_R	Beton- güte	Lastniveau τ_v / τ_v^u	Frequenz Hertz	weitere Variable
AKZ10	BSt III U 0,082	B 25	0,7/0,1 0,7/0,4	5 ; 1 5 ; 1	
AKZ12	BSt III U 0,065	B 25	0,7/0,25 0,8/0,25	5;1;0,2 1	
AKZ17	BSt III U 0,082	B 25	0,7/0,25 0,7/0,4 0,7/0,1	5 ; 1 5 ; 1 5 ; 1	
AKZ19	BSt III U 0,065	B 55	0,7/0,25	1	$t_0=13d$
AKZ20	BSt III U 0,082	B 25	0,8/0,2 0,8/0,5 0,6/ 0	5 ; 1 5 ; 1 5 ; 1	$l_v=3 d_s$
AKZ21	BSt III U 0,065	B 55	0,8/0,2 0,8/0,5 0,6/ 0	5 ; 1 5 ; 1	$l_v=3 d_s$
AKZ24	BSt III U 0,065	B 25	0,8/0,5 0,7/0,25 0,6/ 0 0,6/0,15	5 ; 1 5 ; 1 5 ; 1 5 ; 1	$l_v=3 d_s$
AKZ25	BSt III U 0,065	B 25	0,7/0,25 0,7/0,4	5 5	$t_0=7 d$ $t_0=14d$ $t_0=28d$
AKE6	BSt III U 0,065	B 25	0,7/0,25 0,7/0,4	5 ; 1 5 ; 1	c (Rand- lage) $1d_s$
AKE8	BSt III U 0,065	B 25	0,7/0,25 0,7/0,4	5 ; 1 5 ; 1	c (Eck- lage) $2d_s$
AKE9	BSt III U 0,065	B 25	0,7/0,25 0,7/0,4	5 ; 1 5 ; 1	c (Rand-, Ecklage) $2 d_s$
AKE10	BSt III U 0,065	B 25	0,7/0,25 0,7/0,4	5 ; 1 5 ; 1	c (Rand-, Ecklage) $2 d_s$



Prüfeinrichtung zur Durchführung der Kurzzeitversuche und der Schwellversuche

Ergebnisse der Kurzzeitversuche der unvorbelasteten zylindrischen Probekörper

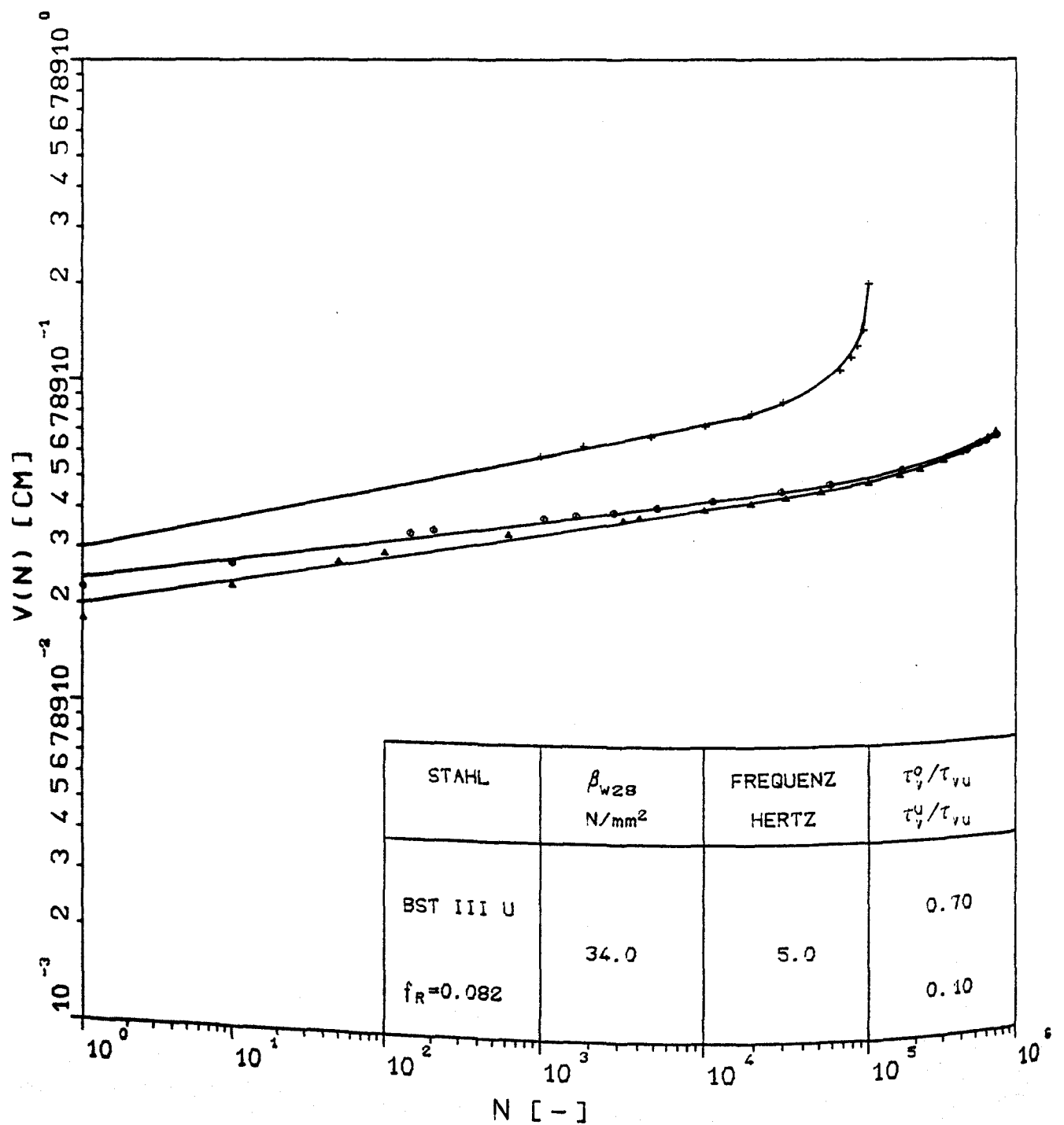
Betonier- serie	Körper Nr.	τ_{vu} N/mm ²	$\tau_{vu} / \beta_w (t_0)$ -
AKZ10 $t_0=180d$	1	18,2	0,47
	3	15,7	0,40
	11	18,0	0,46
	12	18,0	0,46
	Mittel	17,5	-
AKZ12 $t_0=134d$	2	15,7	0,49
	4	17,0	0,53
	9	15,5	0,48
	17	13,1	0,41
	Mittel	15,3	-
AKZ17 $t_0=393d$	3	14,1	0,44
	15	14,5	0,45
	17	17,7	0,55
	Mittel	15,4	-
AKZ19 $t_0=13d$	1	21,2	0,40
	5	22,2	0,42
	6	22,3	0,42
	Mittel	21,9	-
AKZ20 $t_0=279d$	5	19,1	0,51
	10	17,5	0,47
	11	15,1	0,41
	Mittel	17,2	-
AKZ21 $t_0=102d$	1	29,9	0,49
	5	29,3	0,48
	15	30,3	0,50
	Mittel	29,8	-
AKZ24 $t_0=89d$	1	21,5	0,55
	2	20,3	0,52
	3	18,7	0,48
	Mittel	20,2	-
AKZ25 $t_0=7d$	1	11,0	0,39
	2	10,9	0,39
	3	11,0	0,39
	Mittel	11,0	-
AKZ25 $t_0=14d$	4	10,5	0,34
	15	10,5	0,34
	Mittel	10,5	-
AKZ25 $t_0=28d$	10	13,6	0,40
	12	13,8	0,41
	17	15,8	0,46
	Mittel	14,4	-

Ergebnisse der Kurzzeitversuche der unvorbelasteten quadratischen Probekörper

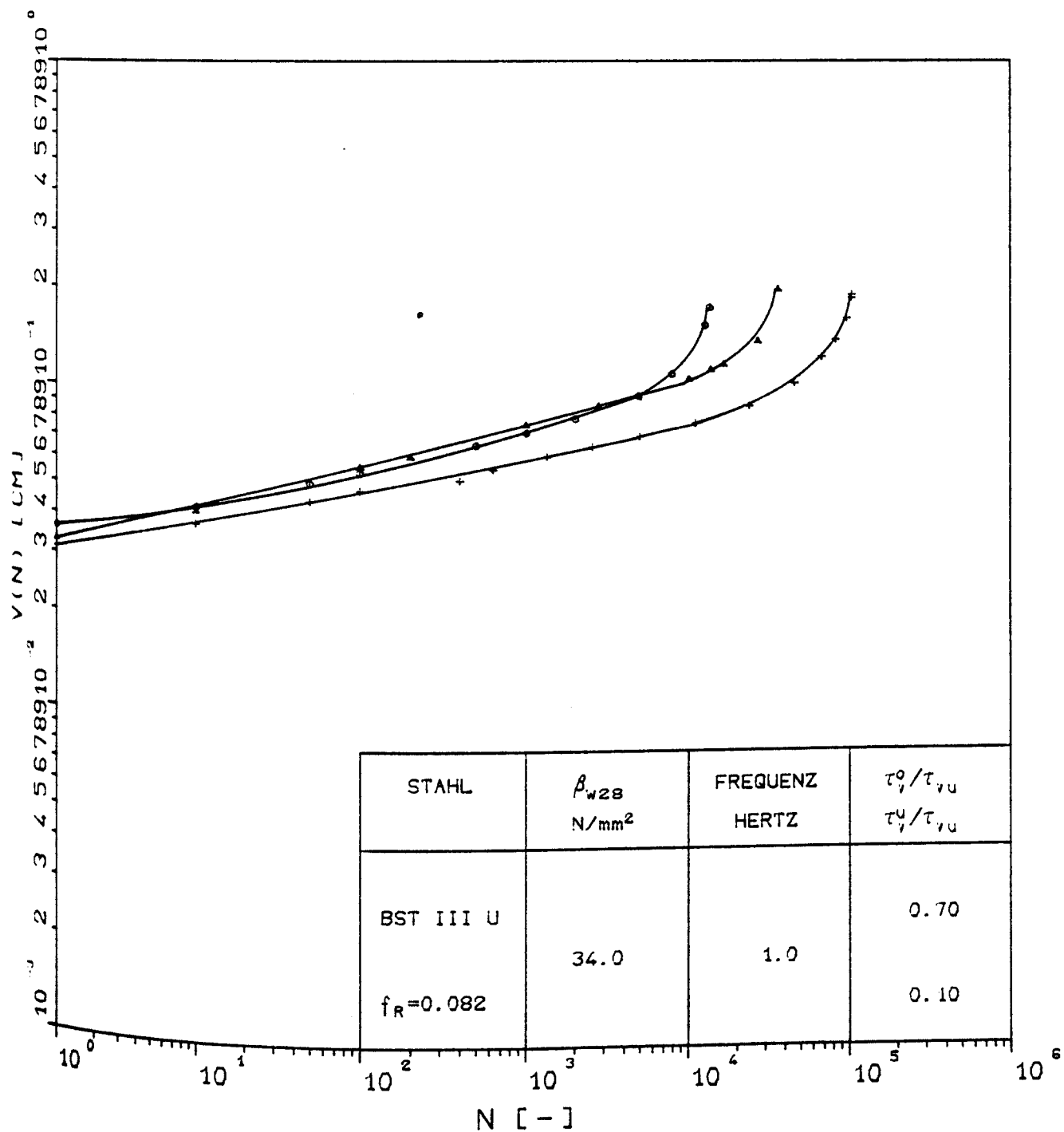
Betonier- serie	Körper Nr.	τ_{vu} N/mm ²	$\tau_{vu} / \beta_w(t_o)$ -
AKE6 $t_o=142d$ 1 d_s Randlage	4	10,8	0,37
	7	11,5	0,40
	Mittel	11,2	-
AKE8 $t_o=210d$ 2 d_s Ecklage	5	11,2	0,35
	6	10,2	0,32
	8	11,7	0,37
	Mittel	11,0	-

Ergebnisse der Kurzzeitversuche der unvorbelasteten quadratischen Probekörper

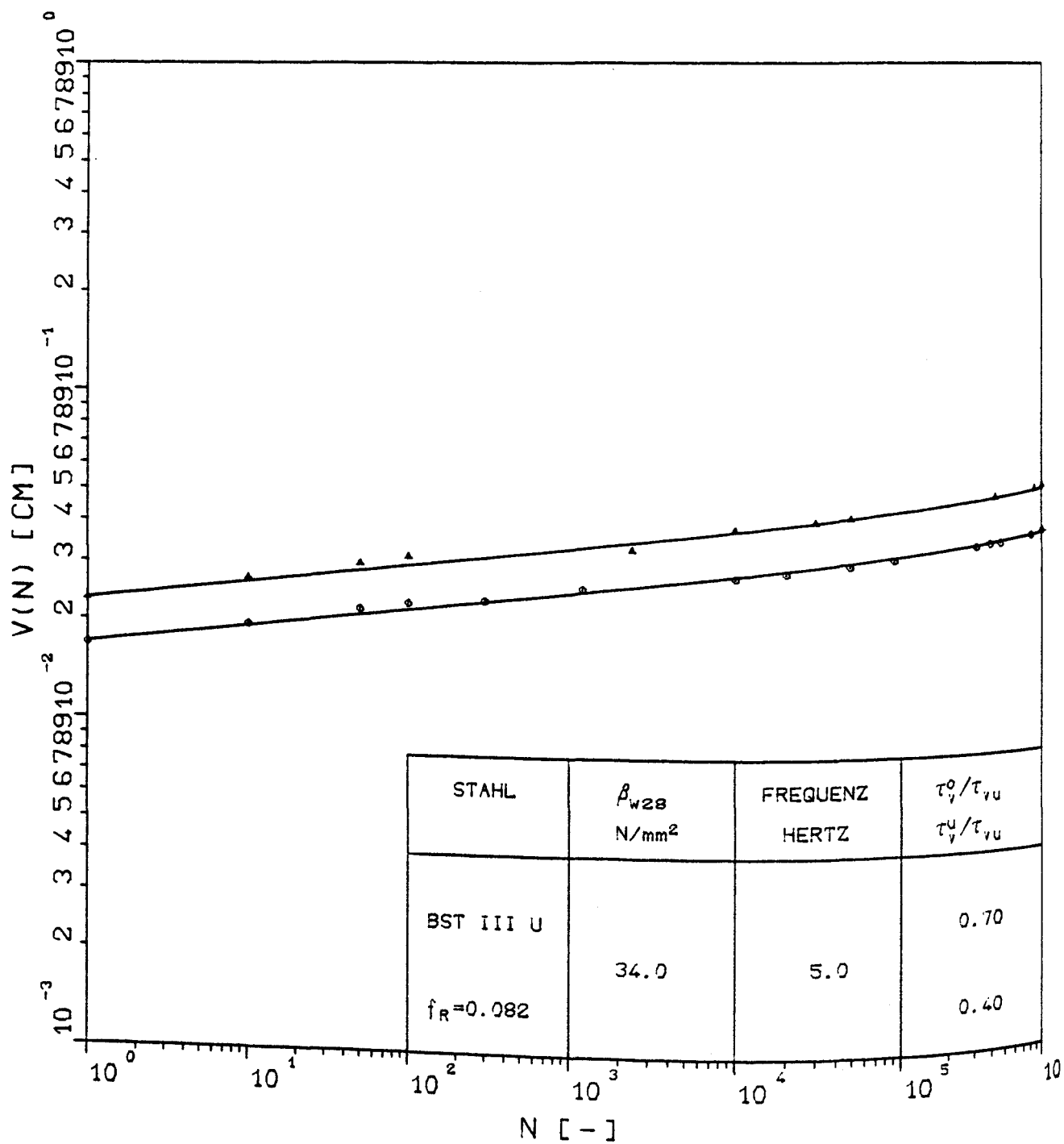
Betonier- serie	Körper Nr.	τ_{vu} N/mm ²	$\tau_{vu}/\beta_w(t_o)$ -
AKE6 $t_o=142d$ 1 d_s Randlage	4	10,8	0,37
	7	11,5	0,40
	Mittel	11,2	-
AKE8 $t_o=210d$ 2 d_s Ecklage	5	11,2	0,35
	6	10,2	0,32
	8	11,7	0,37
	Mittel	11,0	-



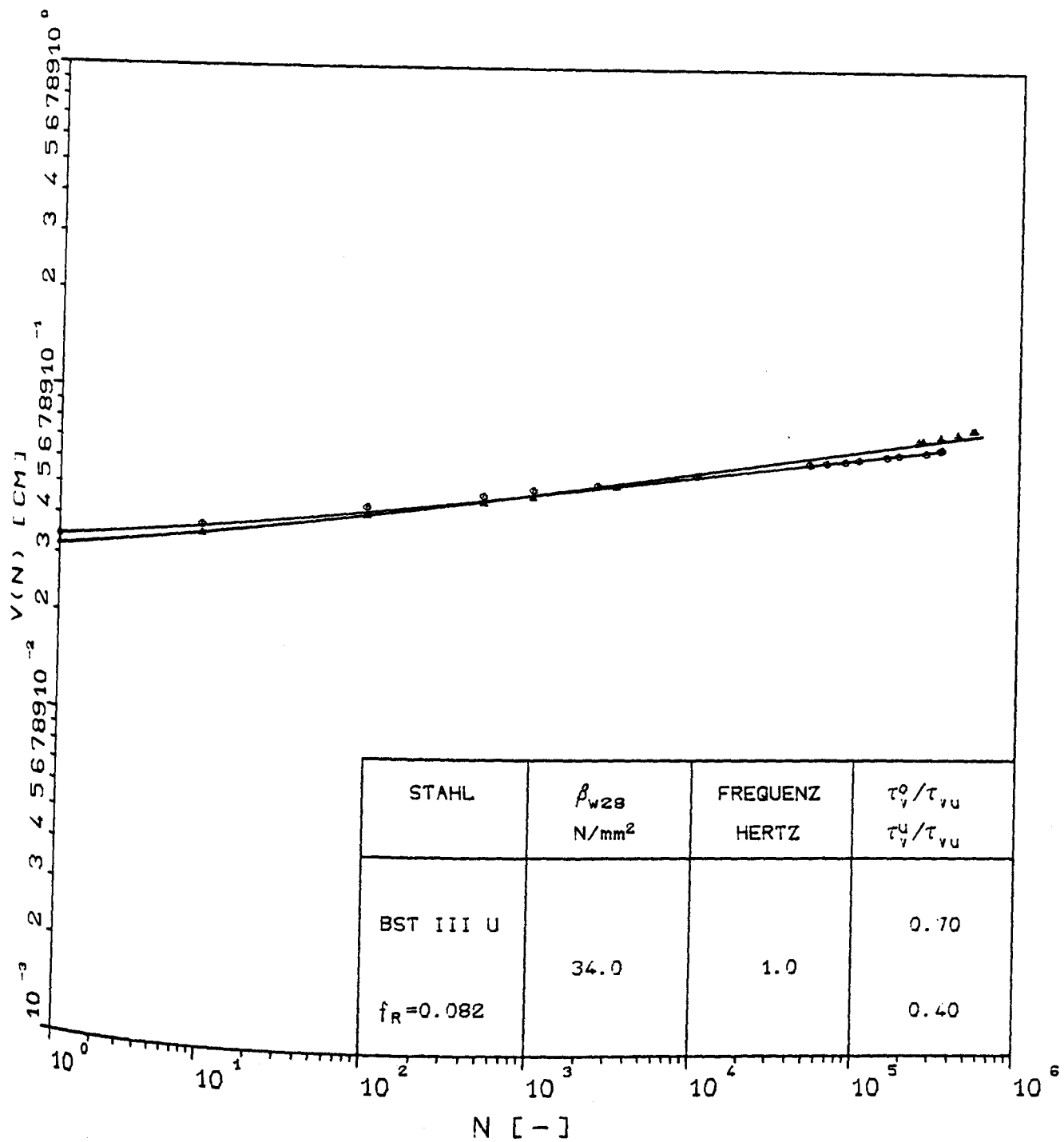
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ10.04, AKZ10.07 und AKZ10.15)



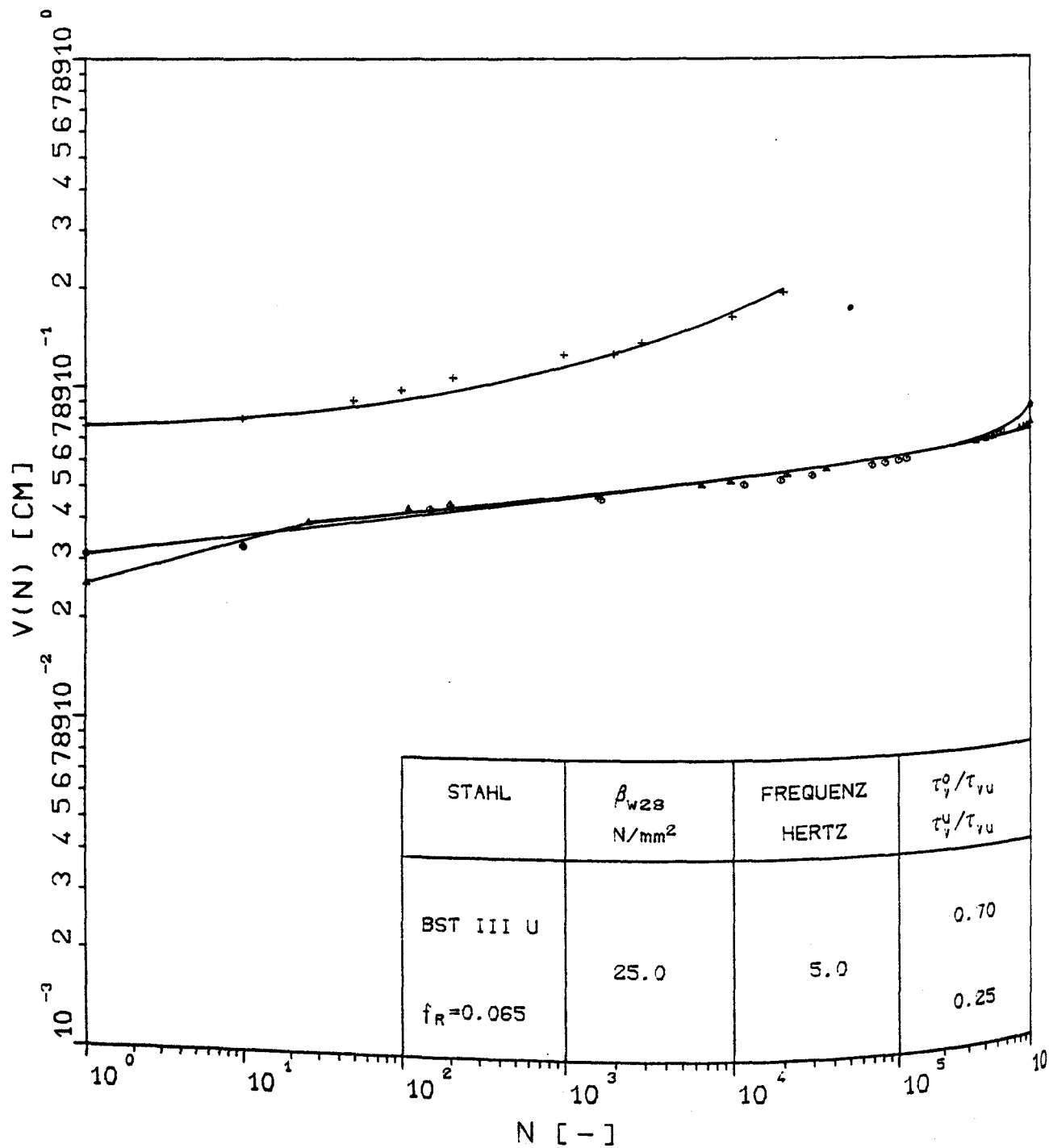
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ10.09, AKZ10.19 und AKZ10.20)



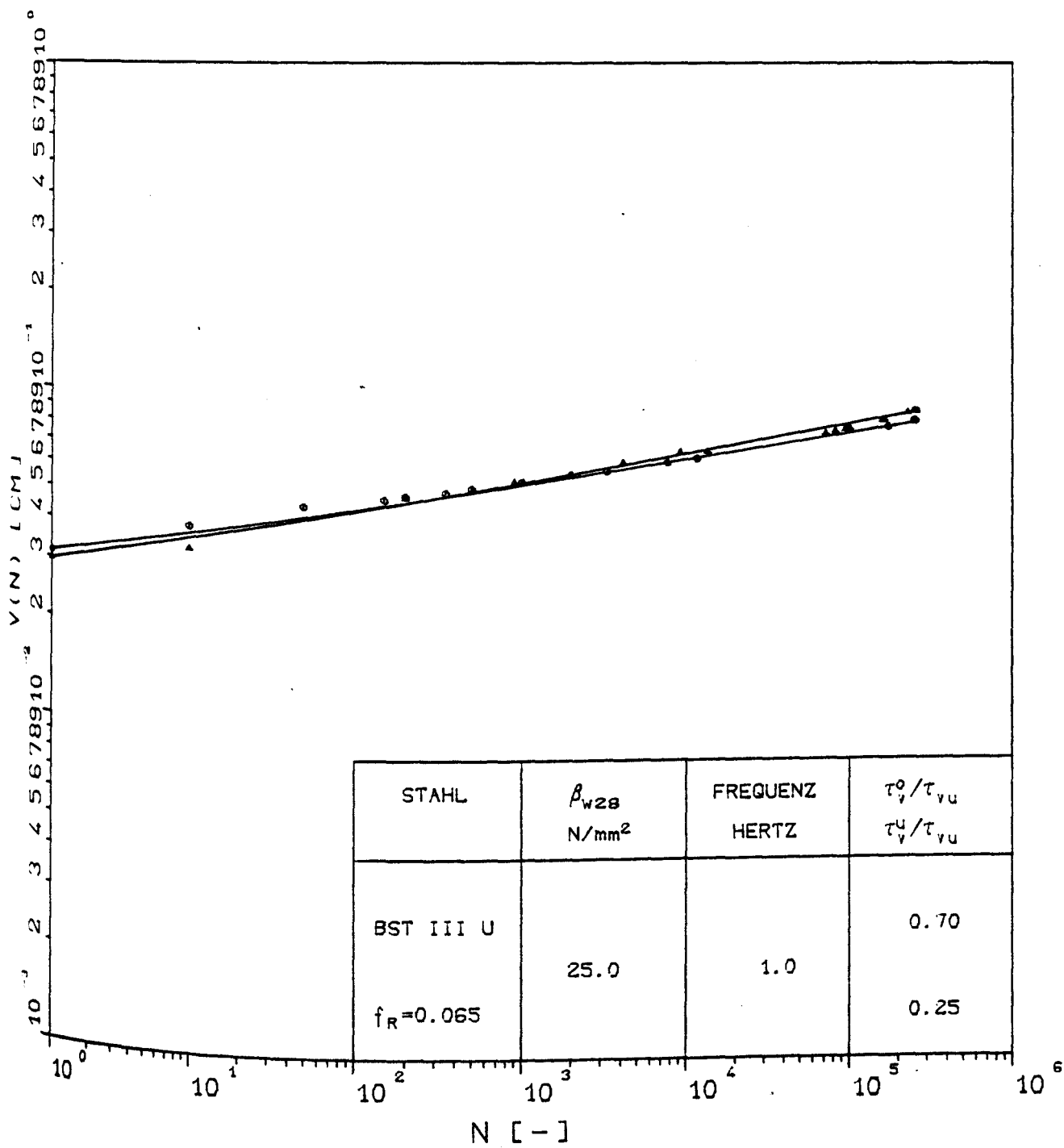
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ10.17 und AKZ10.18)



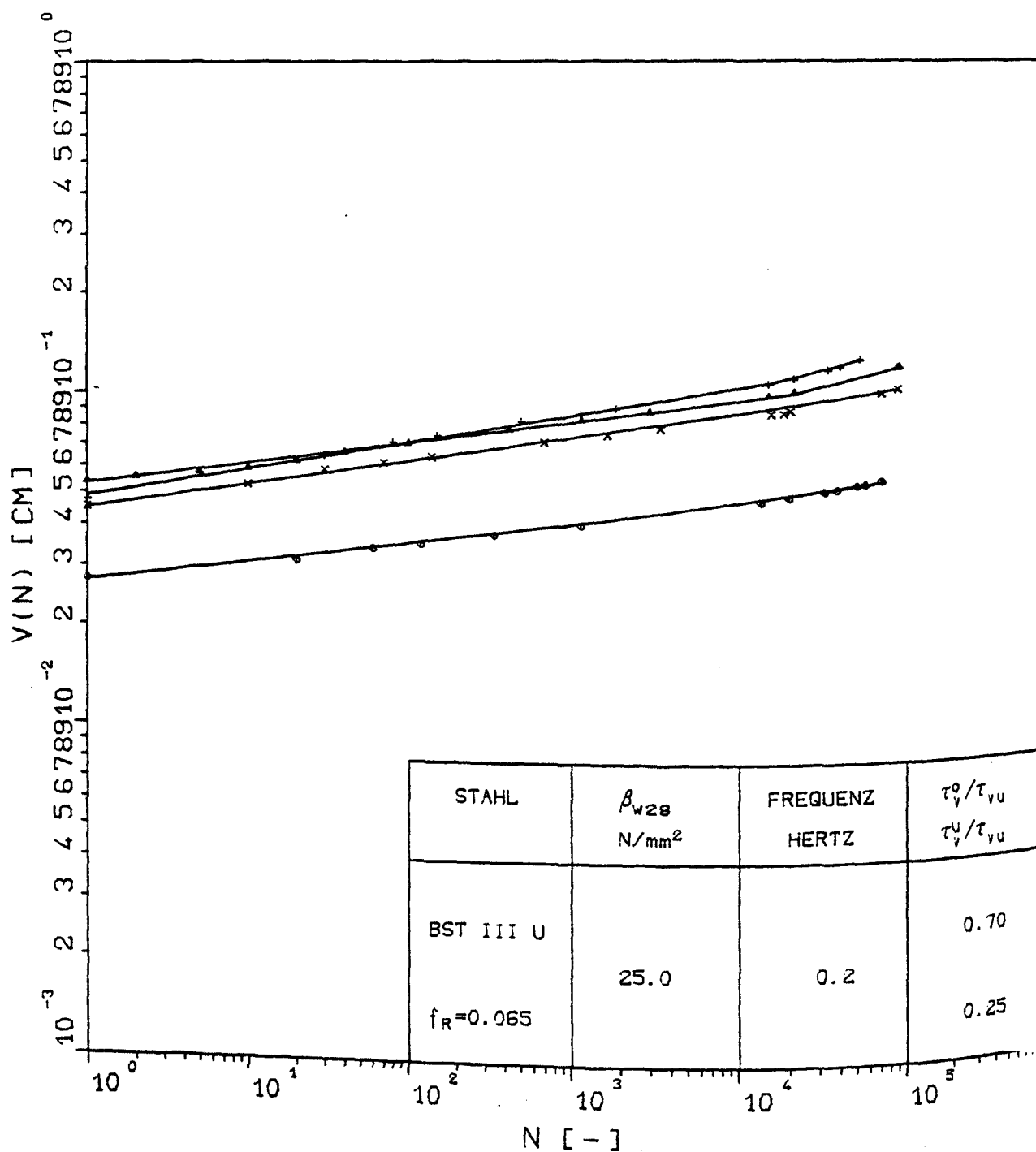
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ10.08 und AKZ10.10)



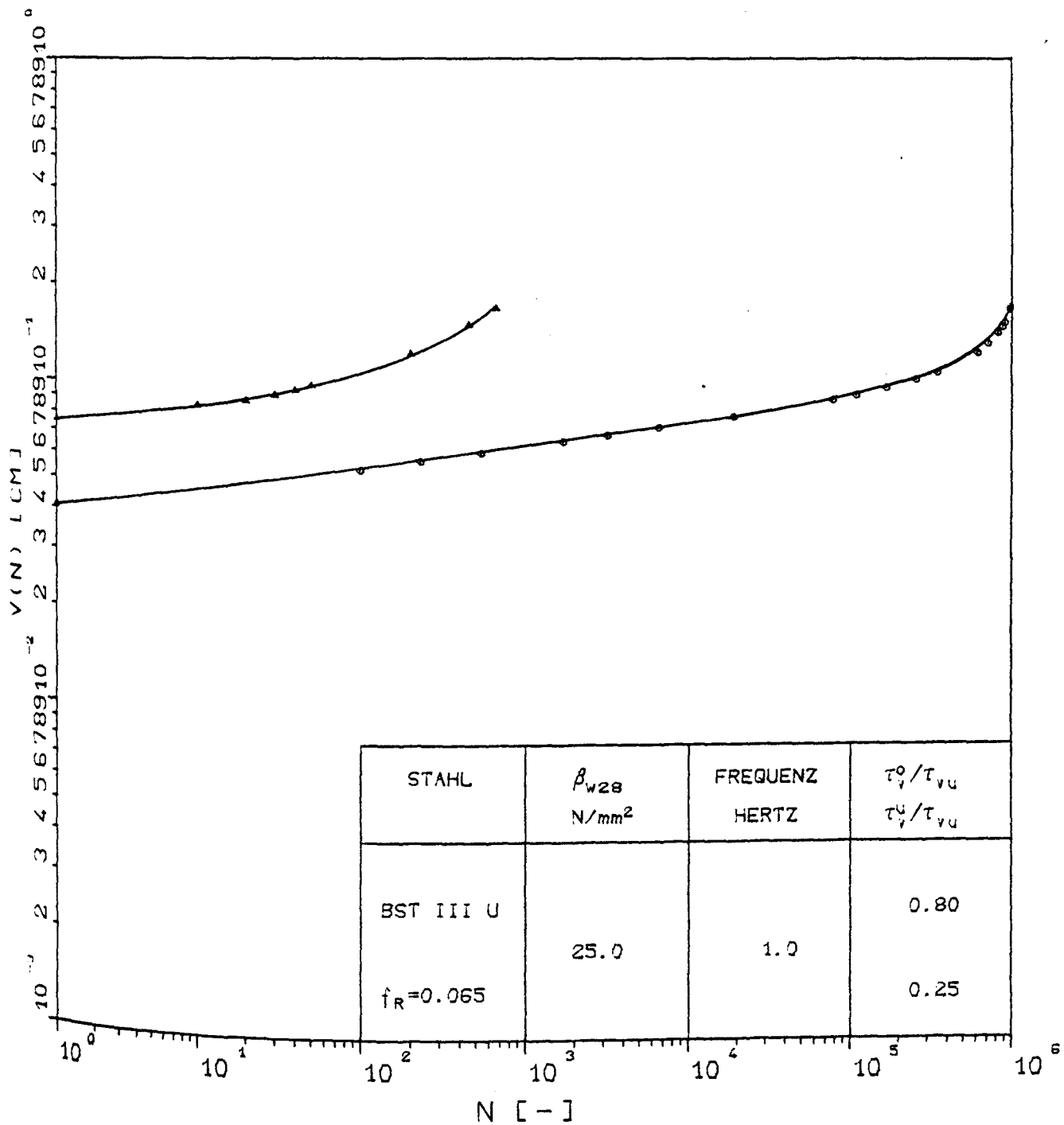
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ12.15 und AKZ12.18)



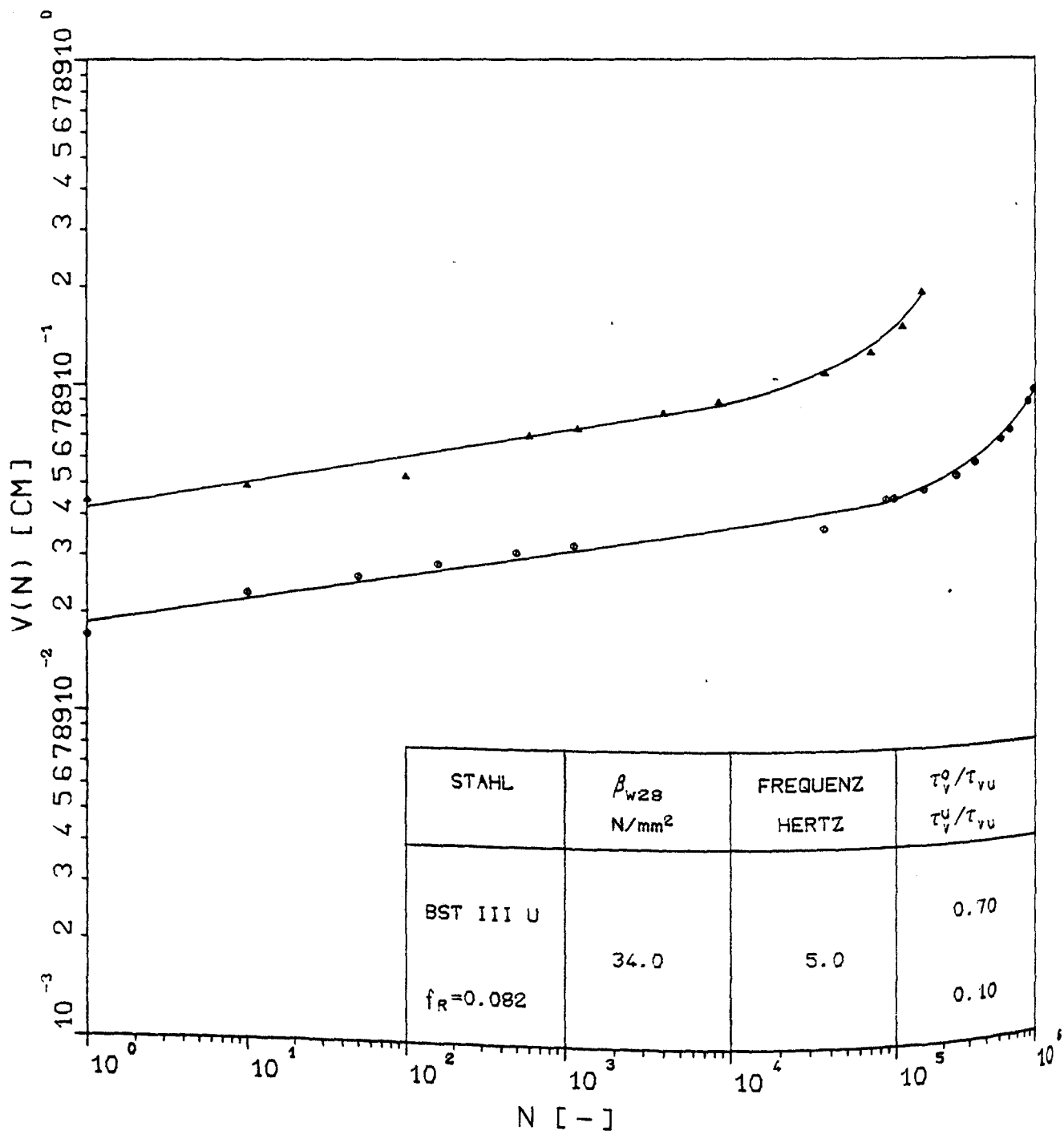
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ12.07 und AKZ12.14)



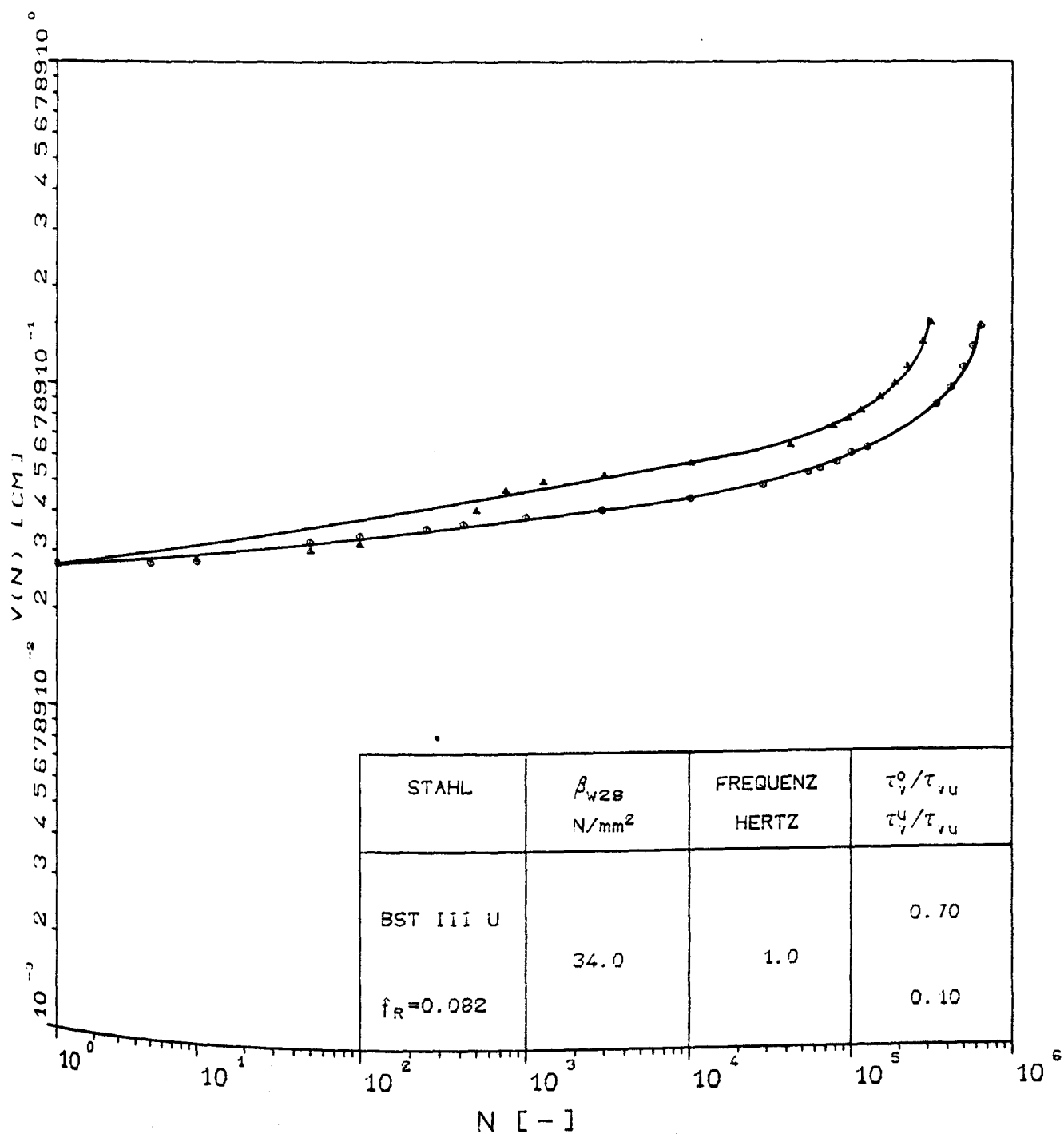
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ12
AKZ12.06, AKZ12.10 und AKZ12.16)



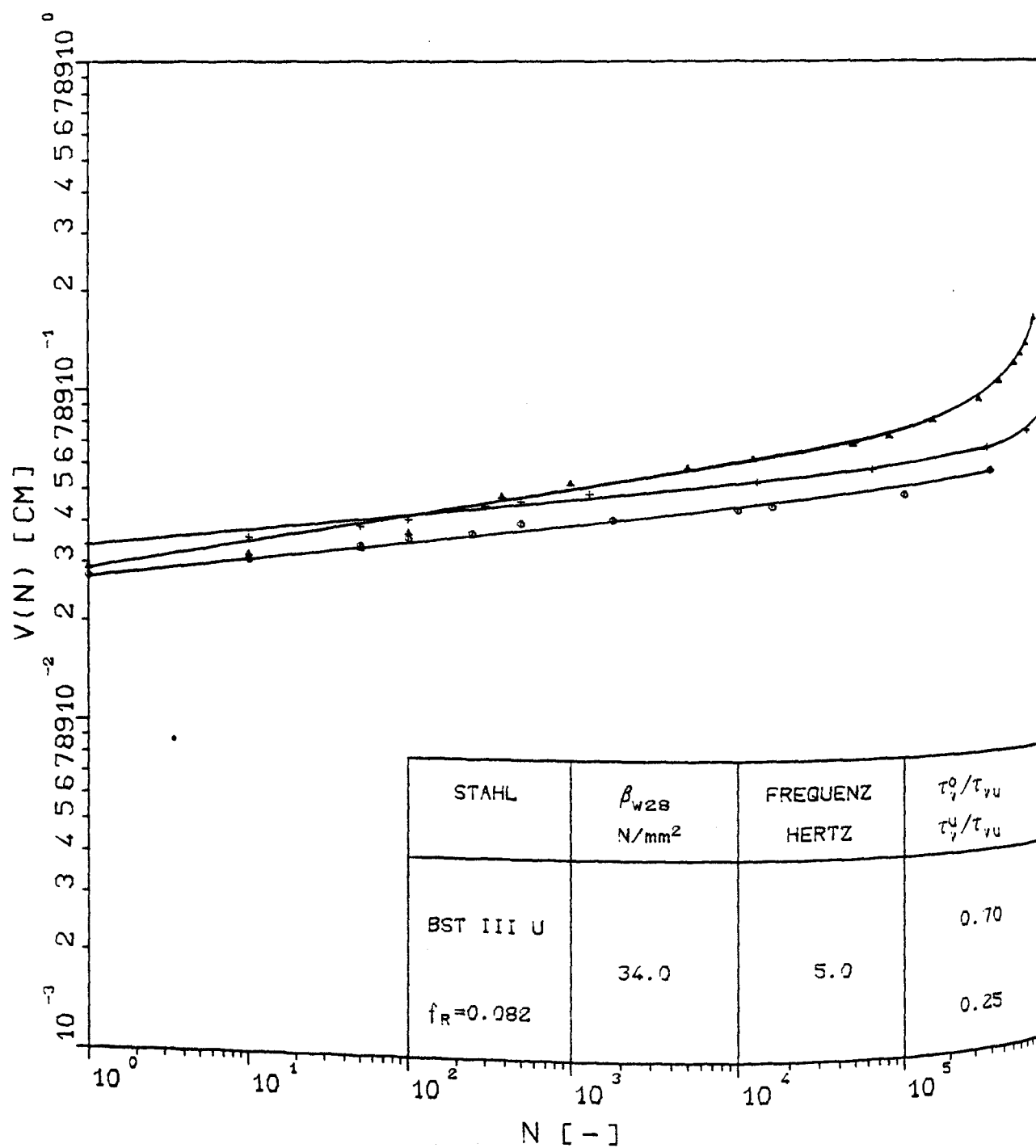
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ12.01 und AKZ12.20)



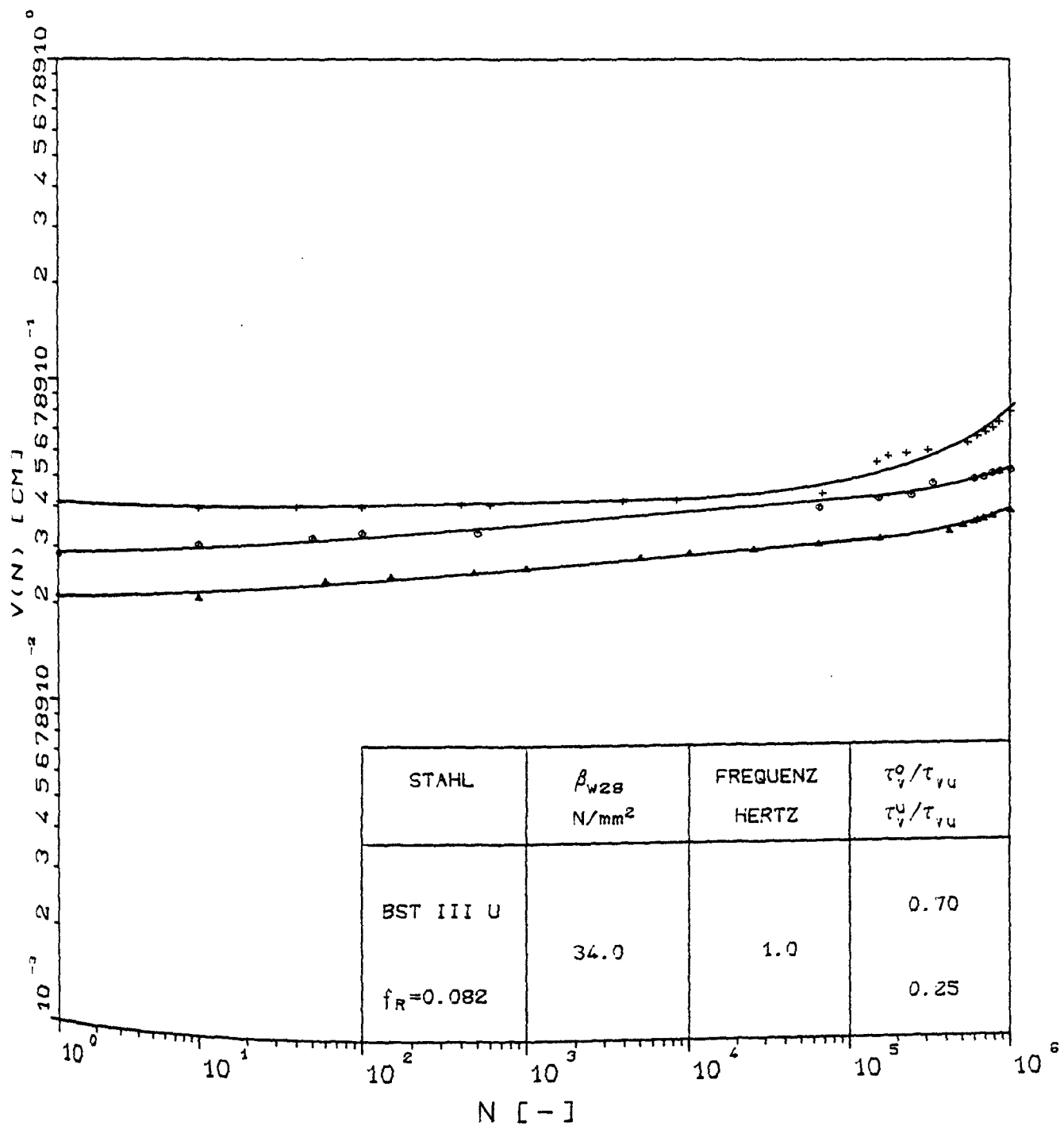
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ17.10 und AKZ17.18)



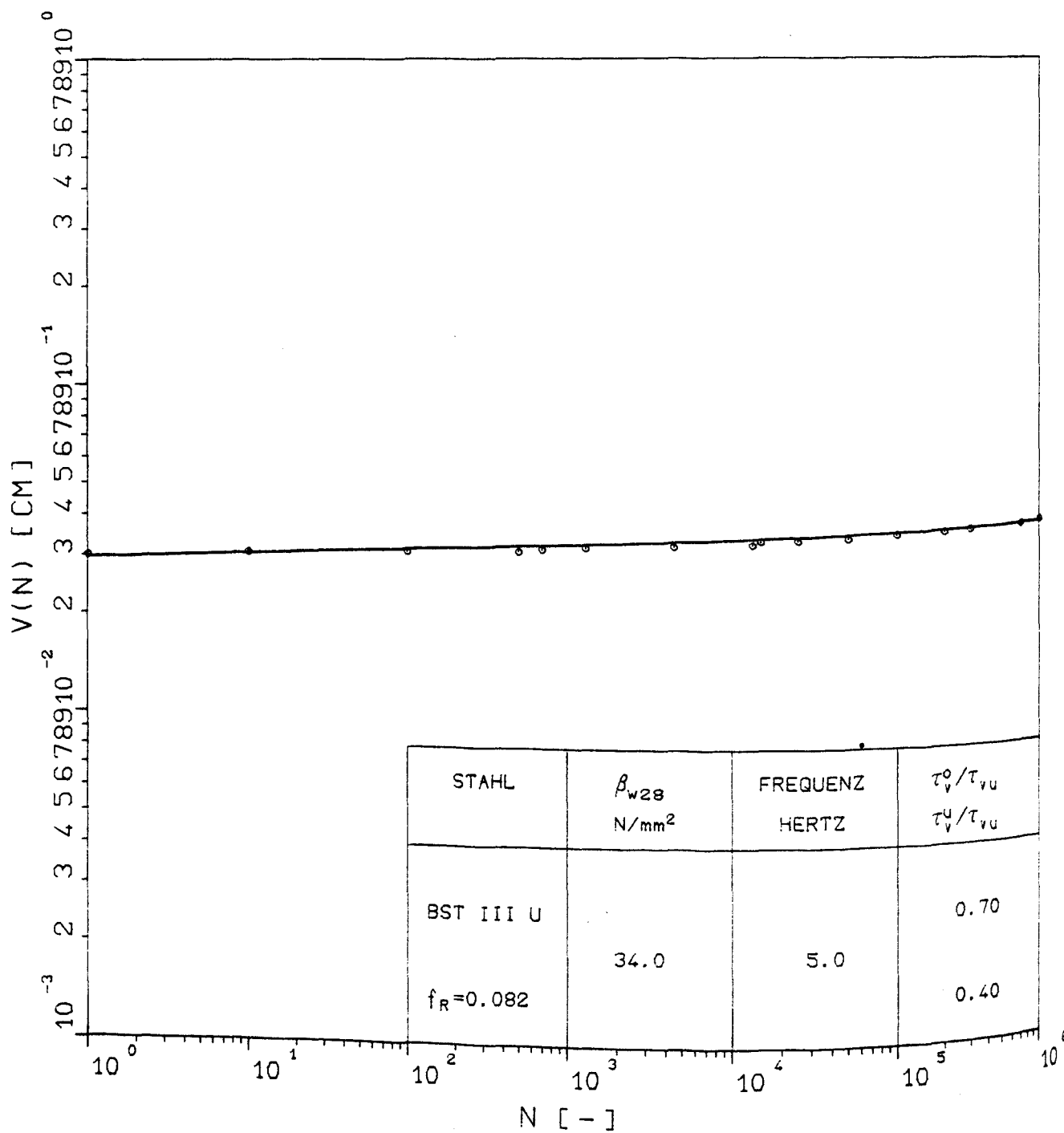
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ17.05 und AKZ17.06)



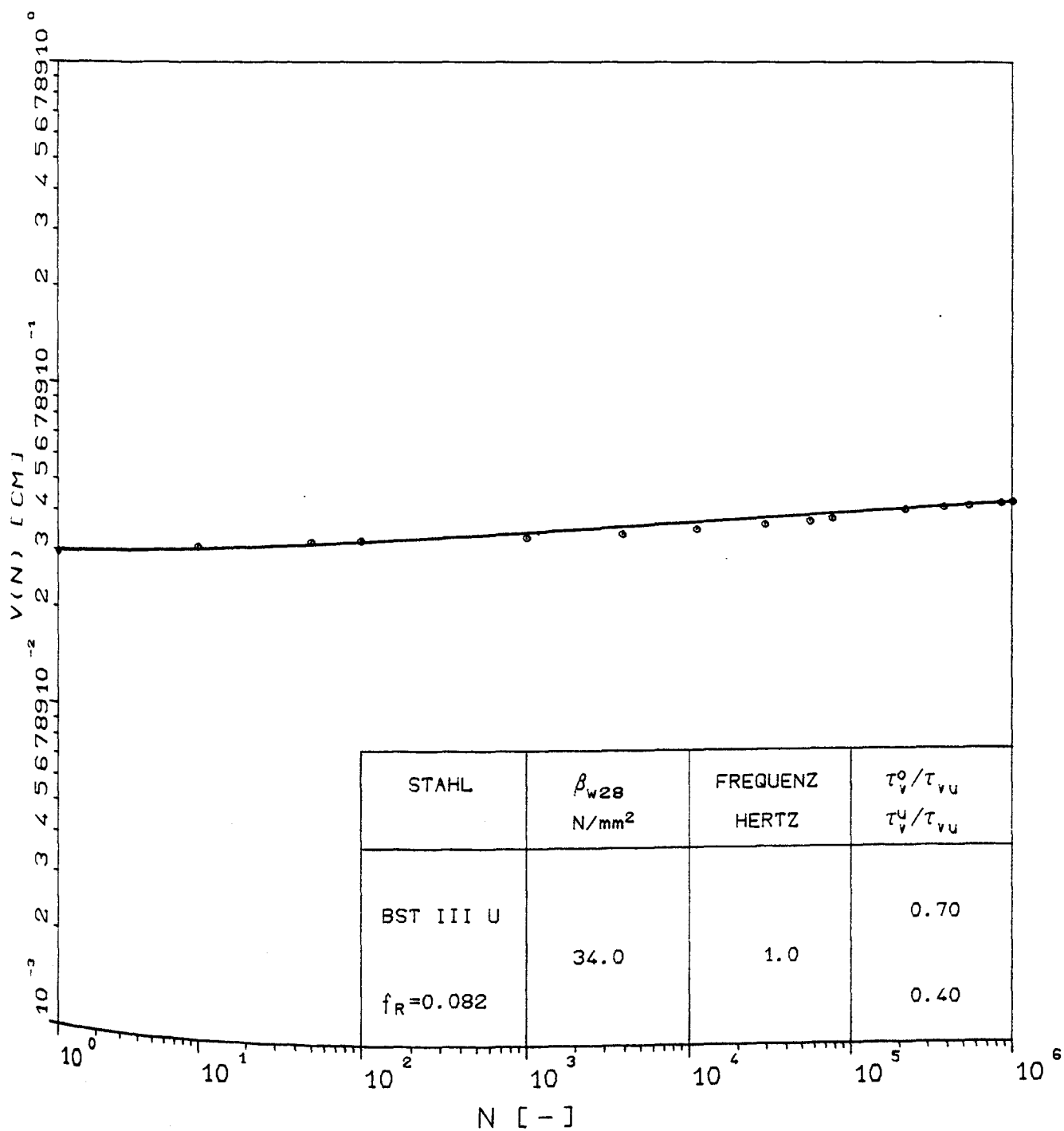
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ17.0
AKZ17.07 und AKZ17.19)



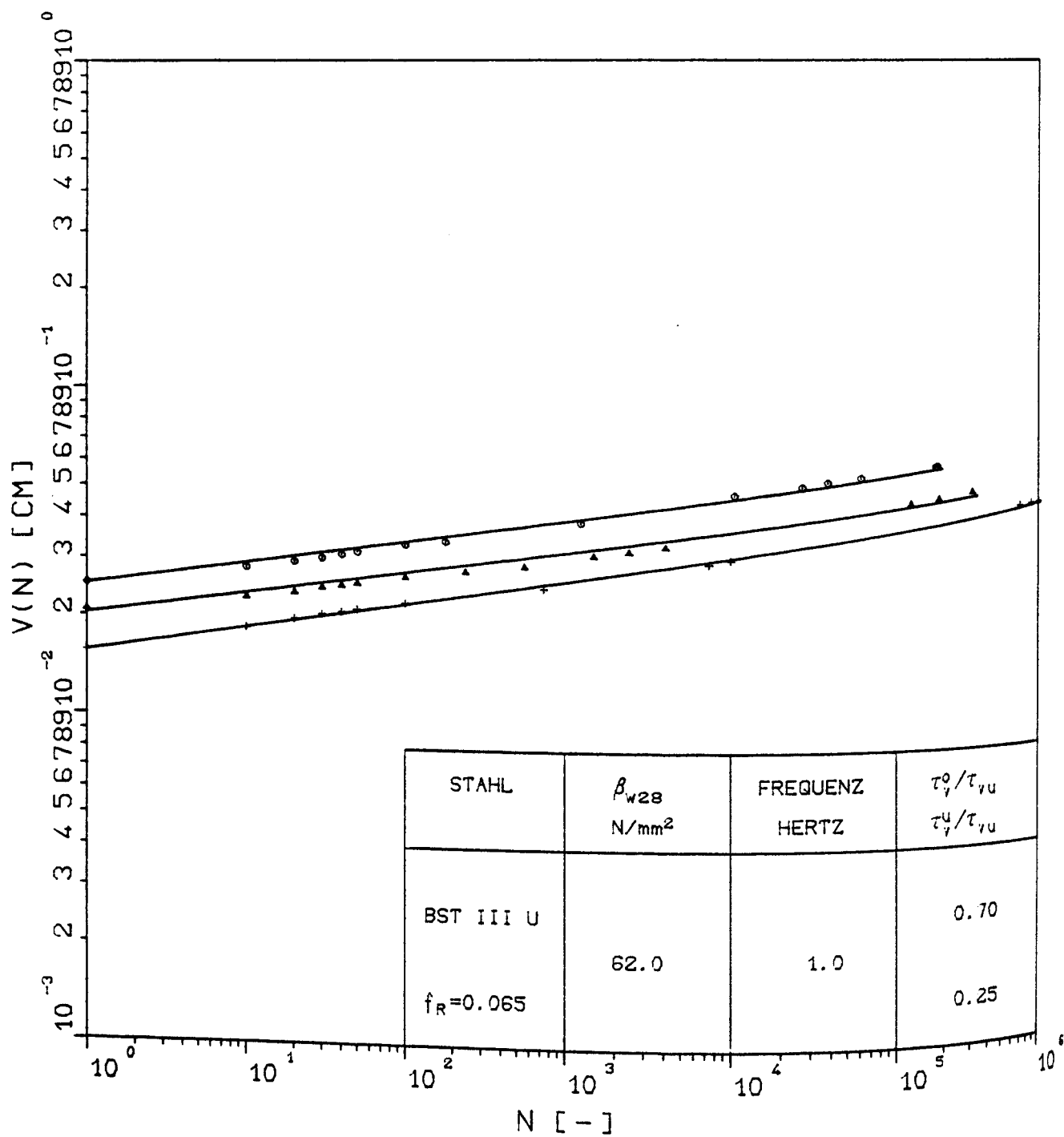
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ17.02, AKZ17.12 und AKZ17.13)



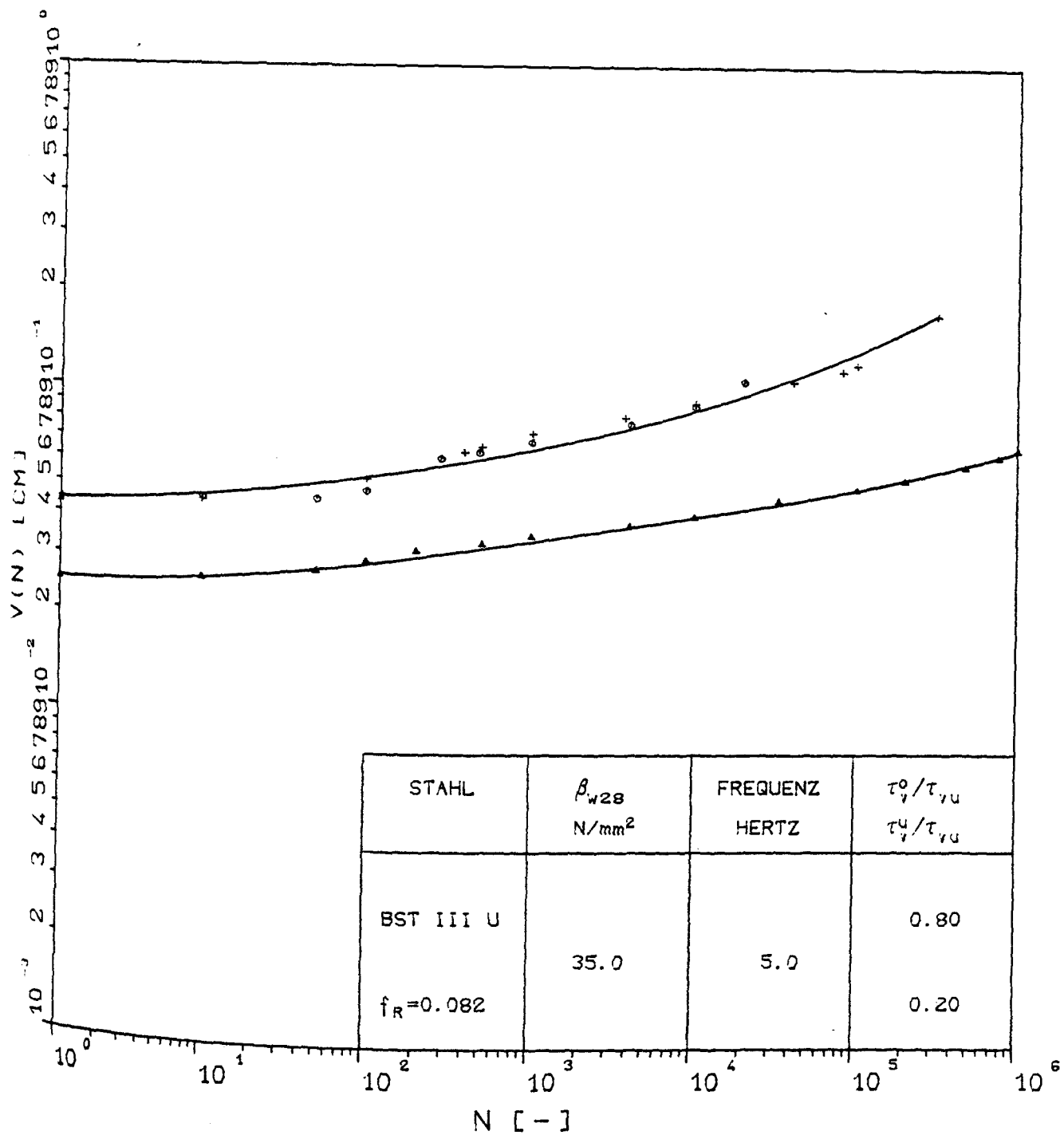
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuch AKZ17.01)



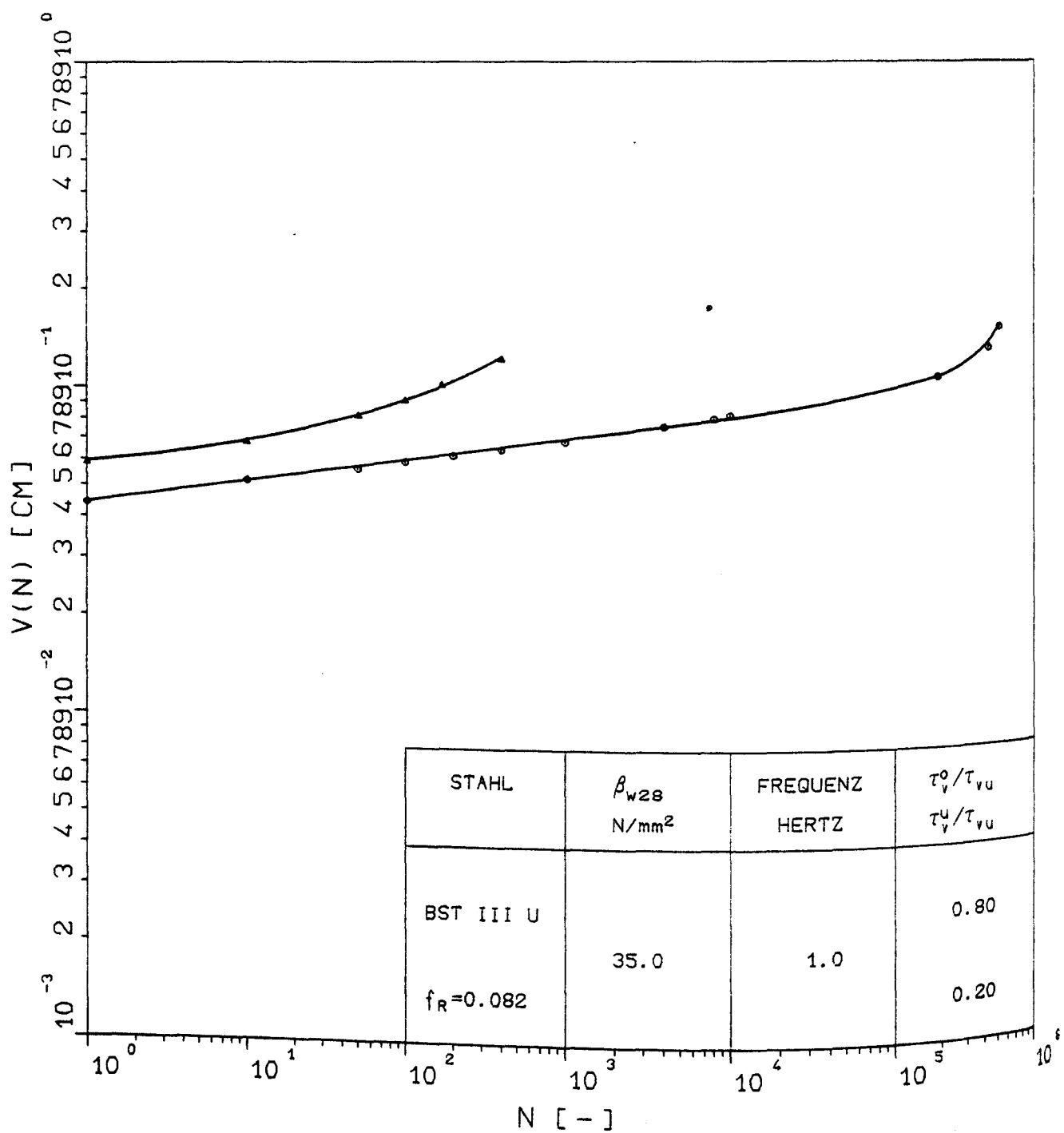
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuch AKZ17.08)



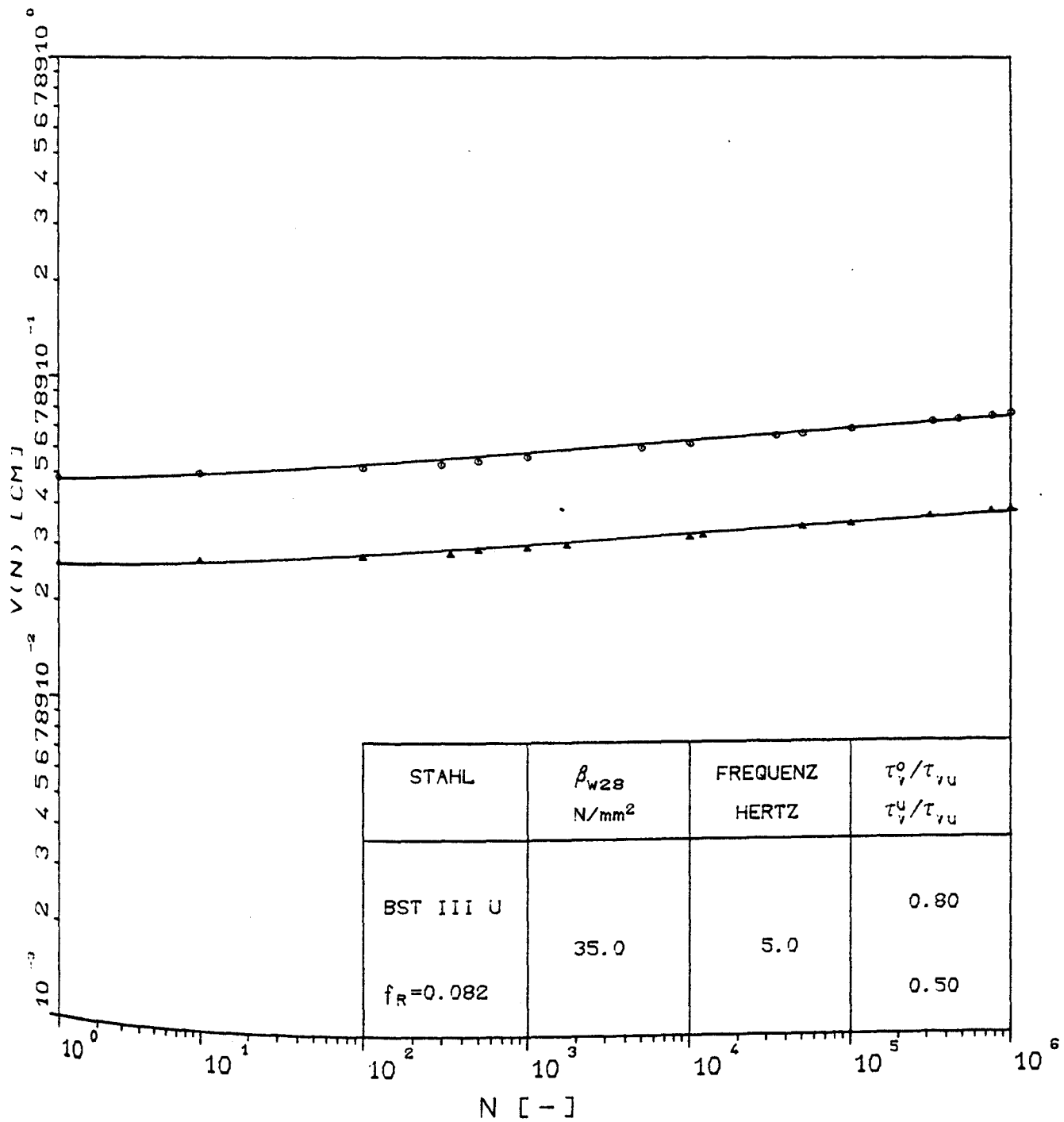
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ19.03, AKZ19.08 und AKZ19.16)



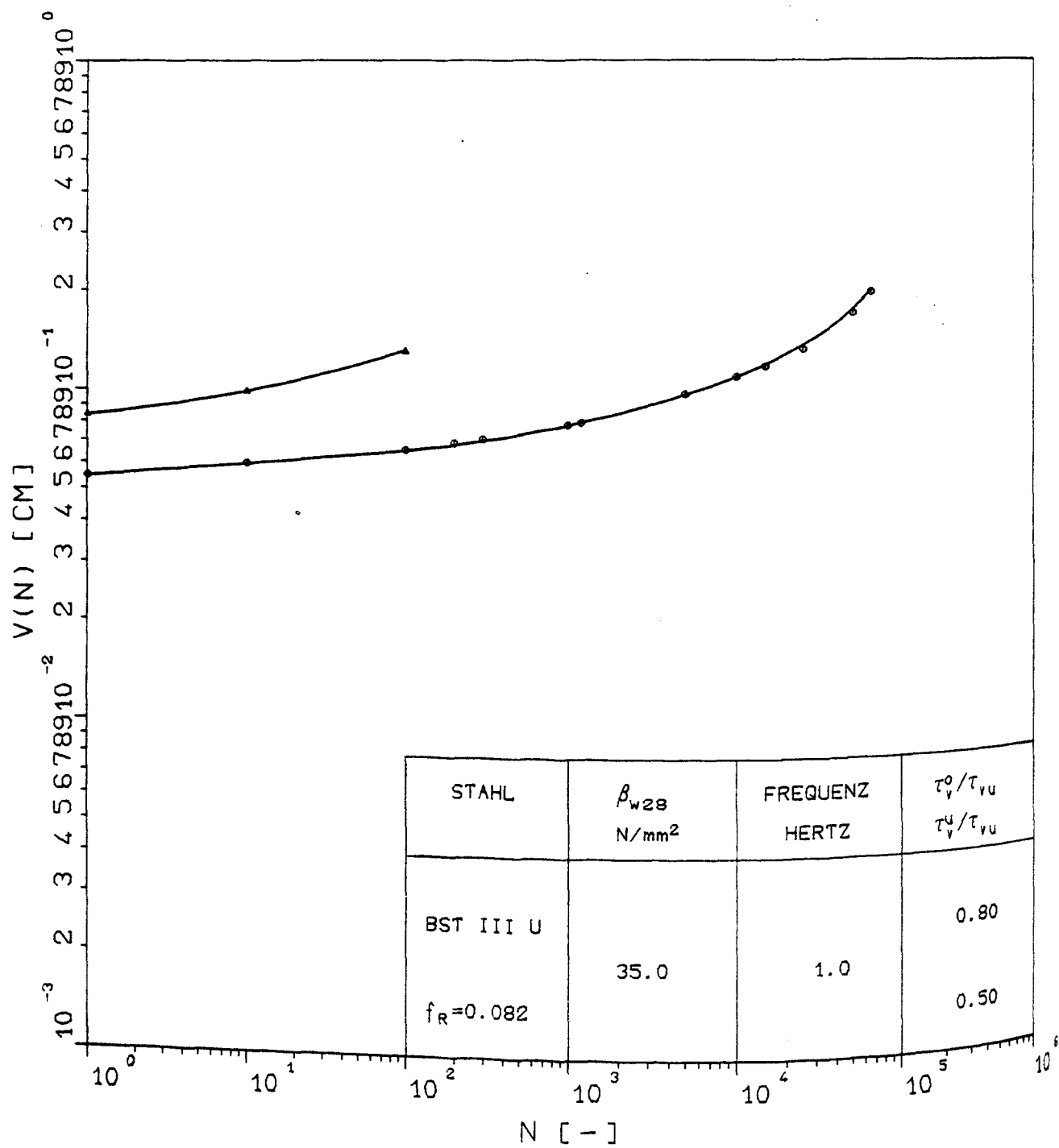
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ20.02, AKZ20.13 und AKZ20.18)



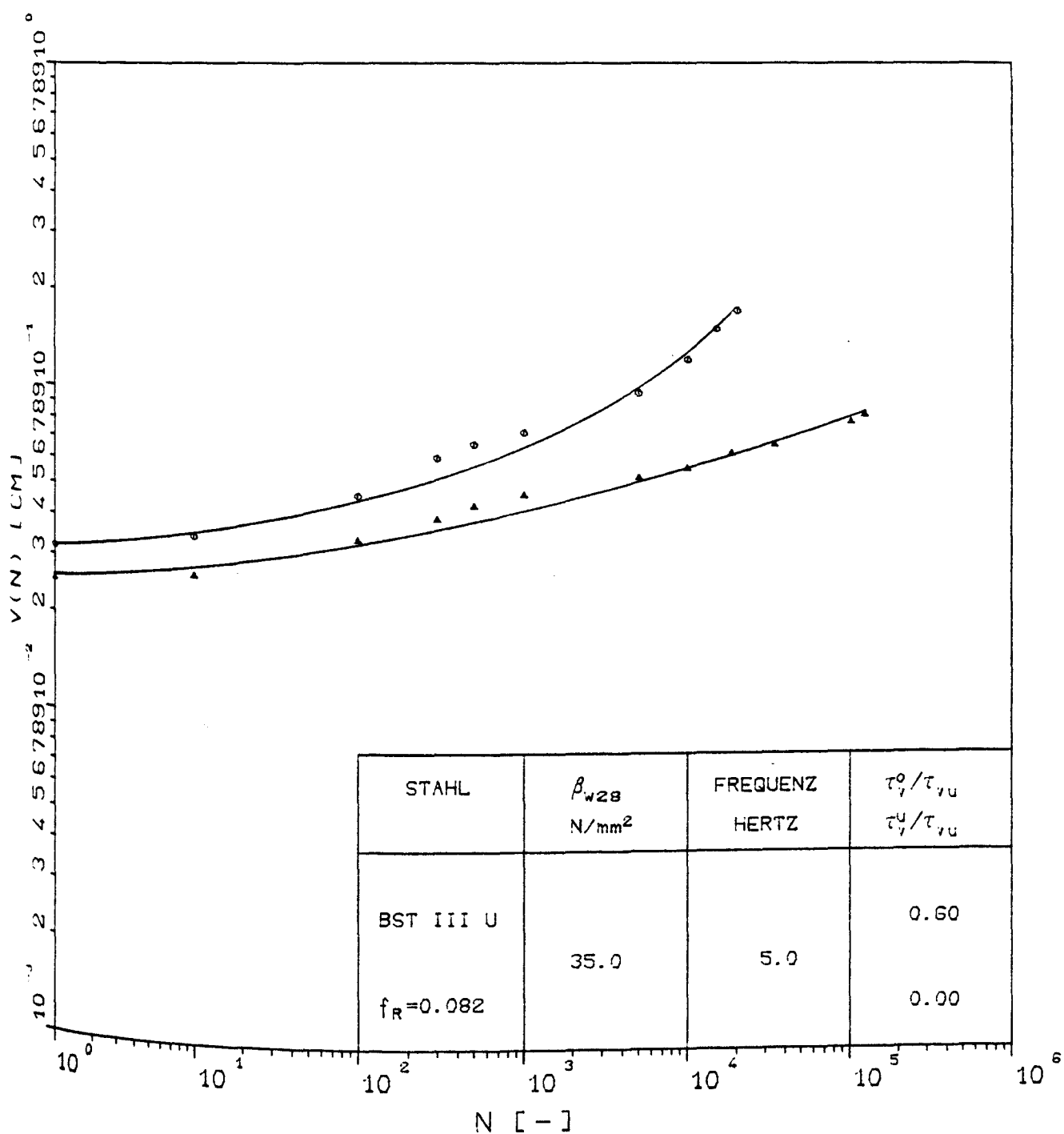
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ20.14 und AKZ20.19)



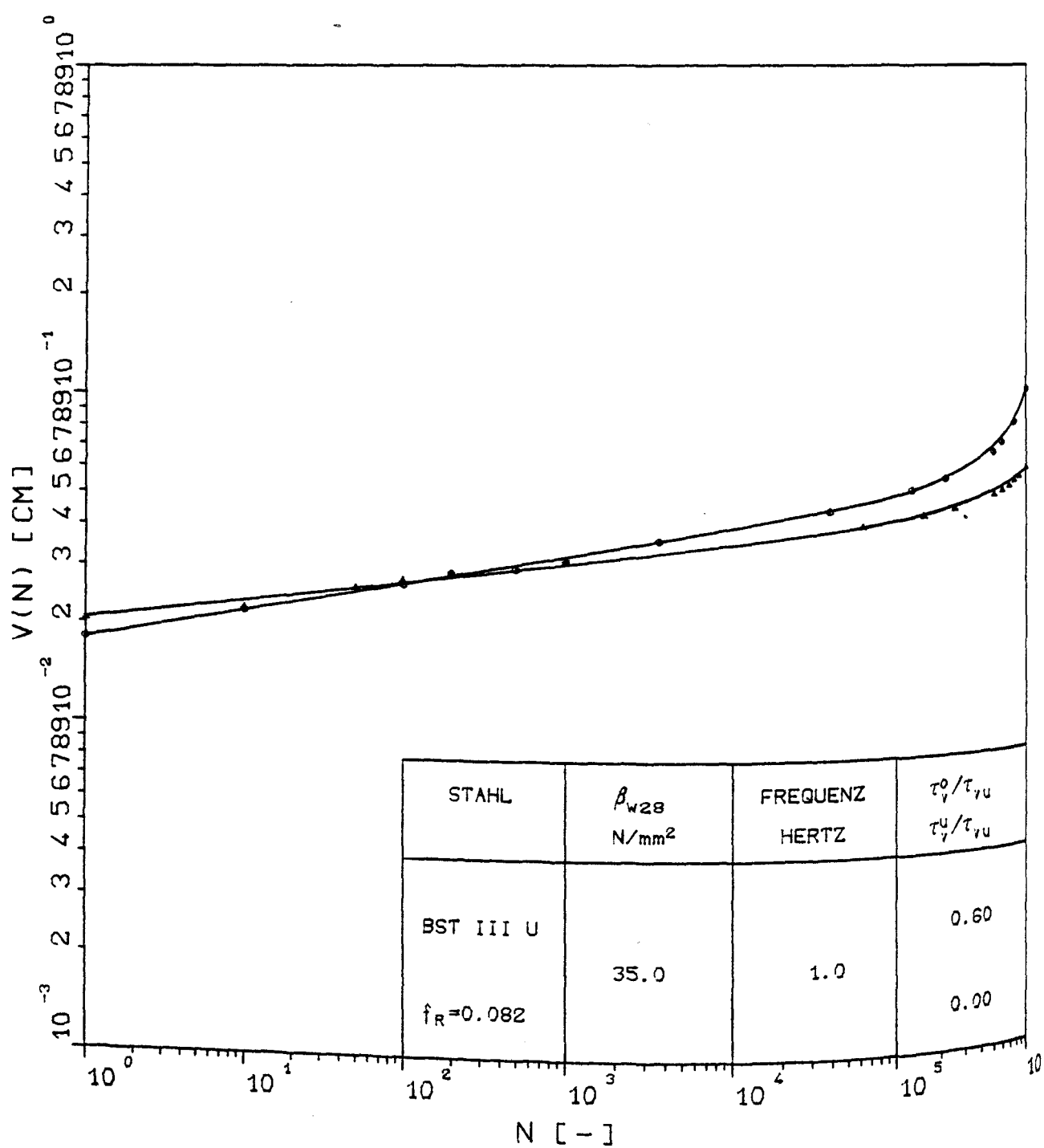
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ20.07 und AKZ20.08)



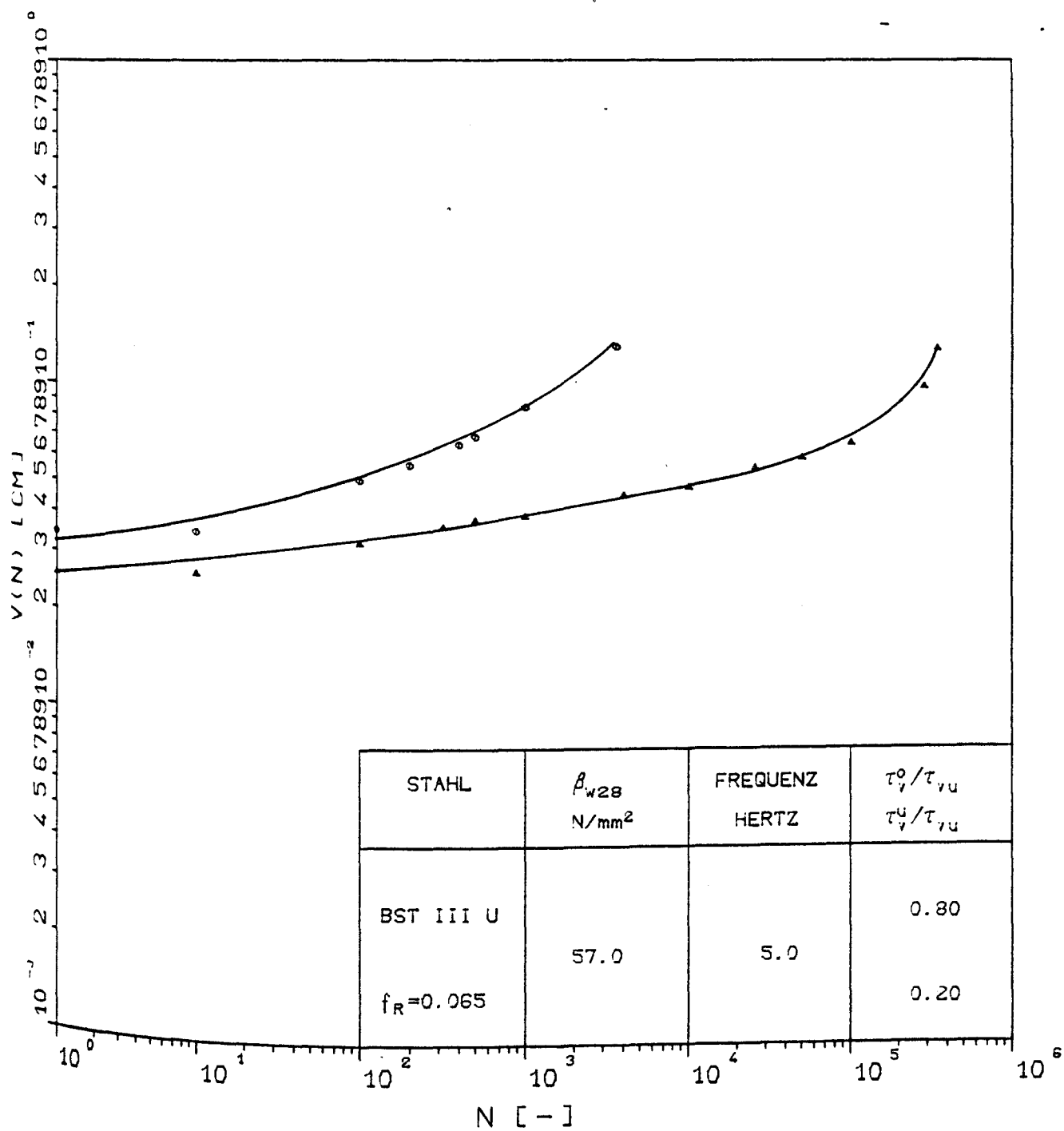
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der lastspielzahl (Versuche AKZ20.04 und AKZ20.16)



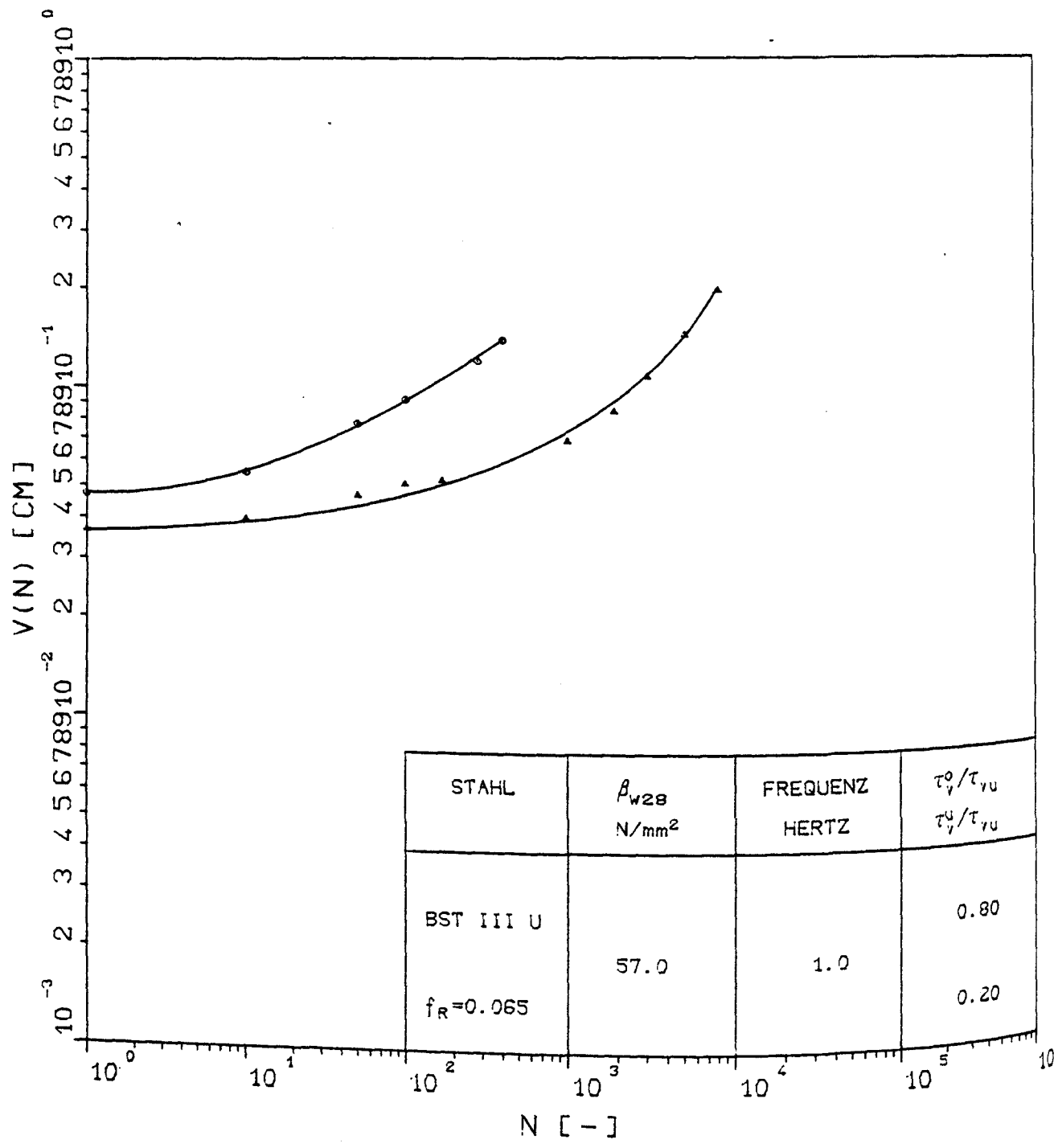
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ20.15 und AKZ20.17)



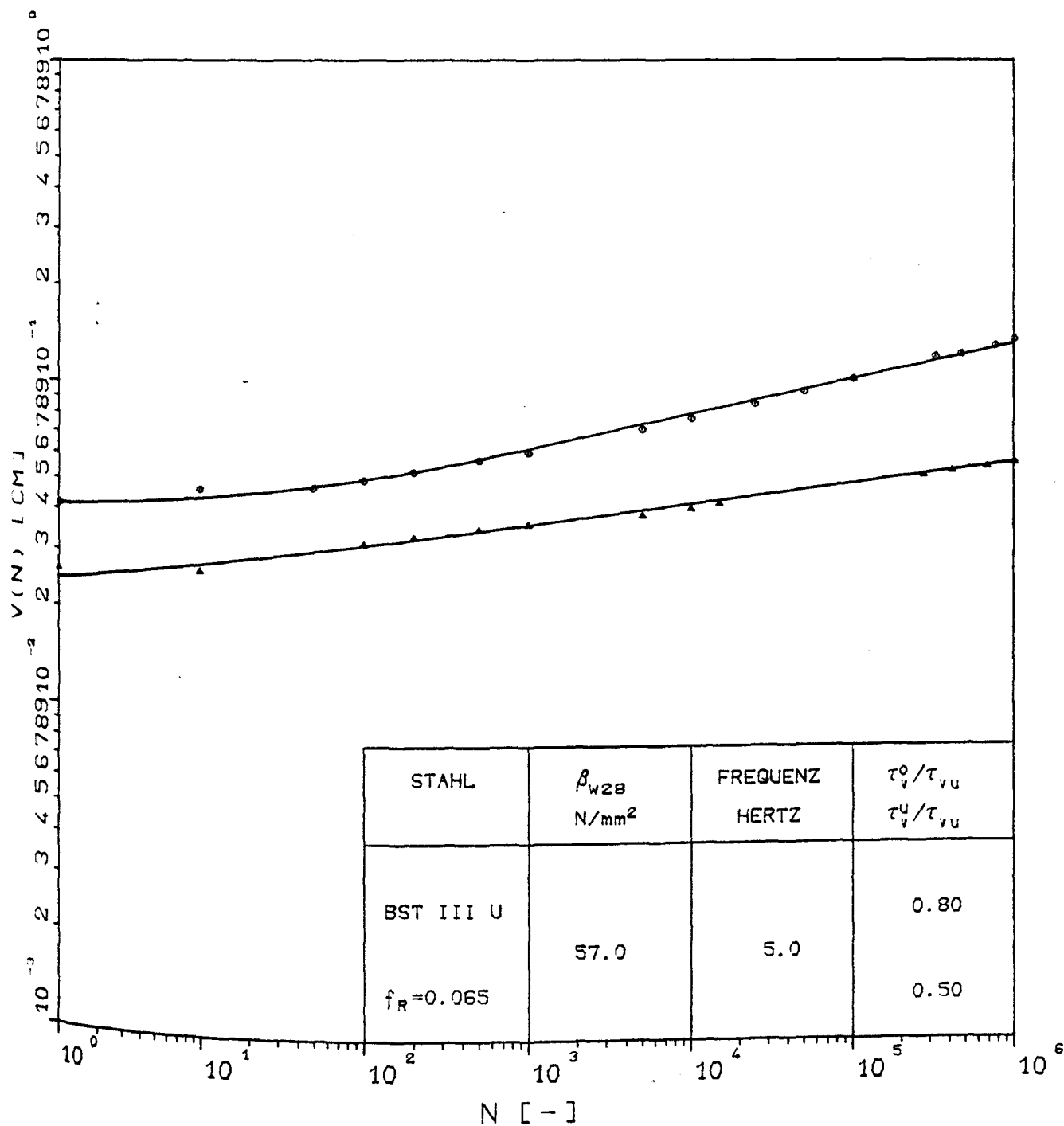
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ20.09 und AKZ20.12)



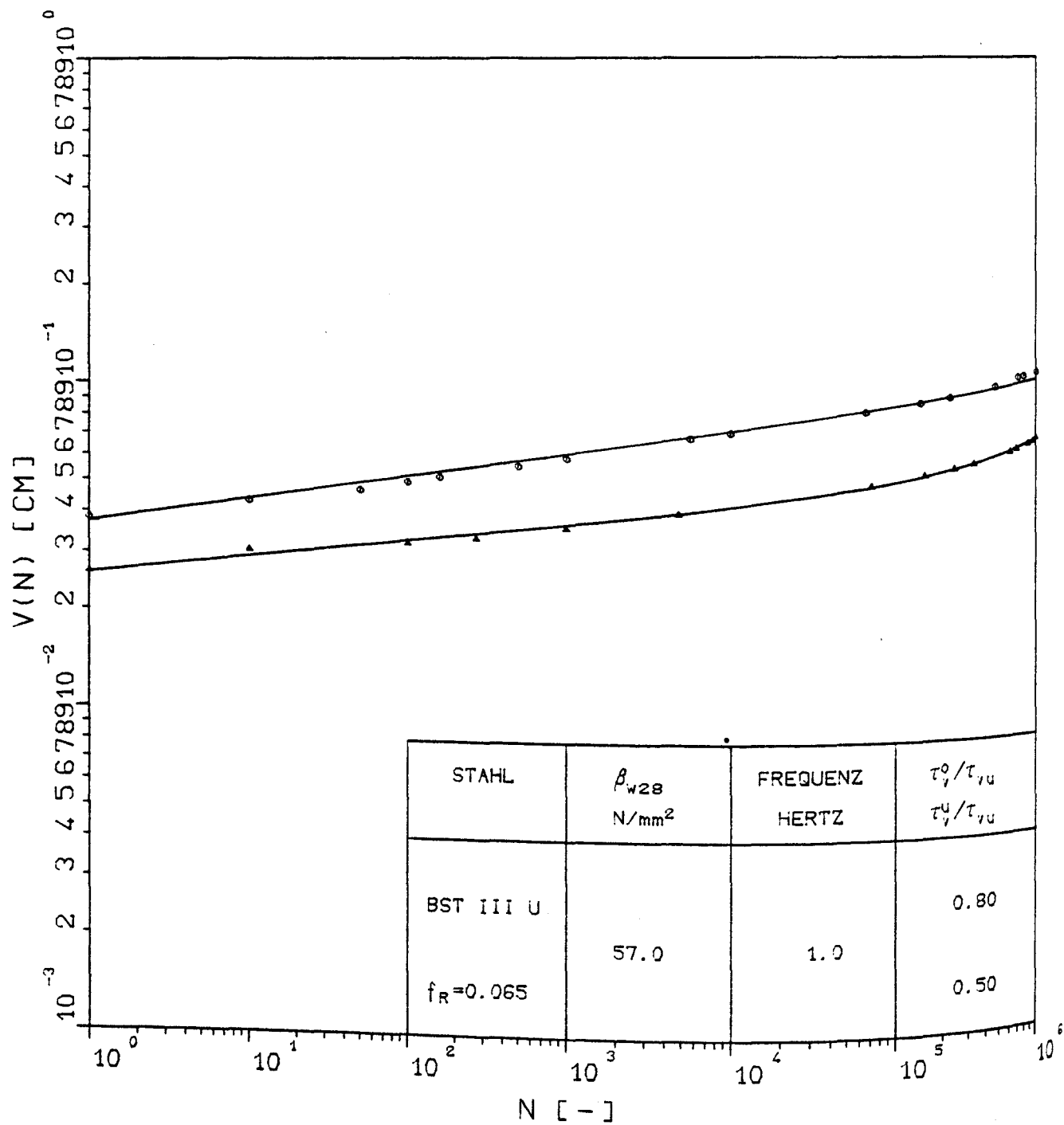
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ21.02 und AKZ21.11)



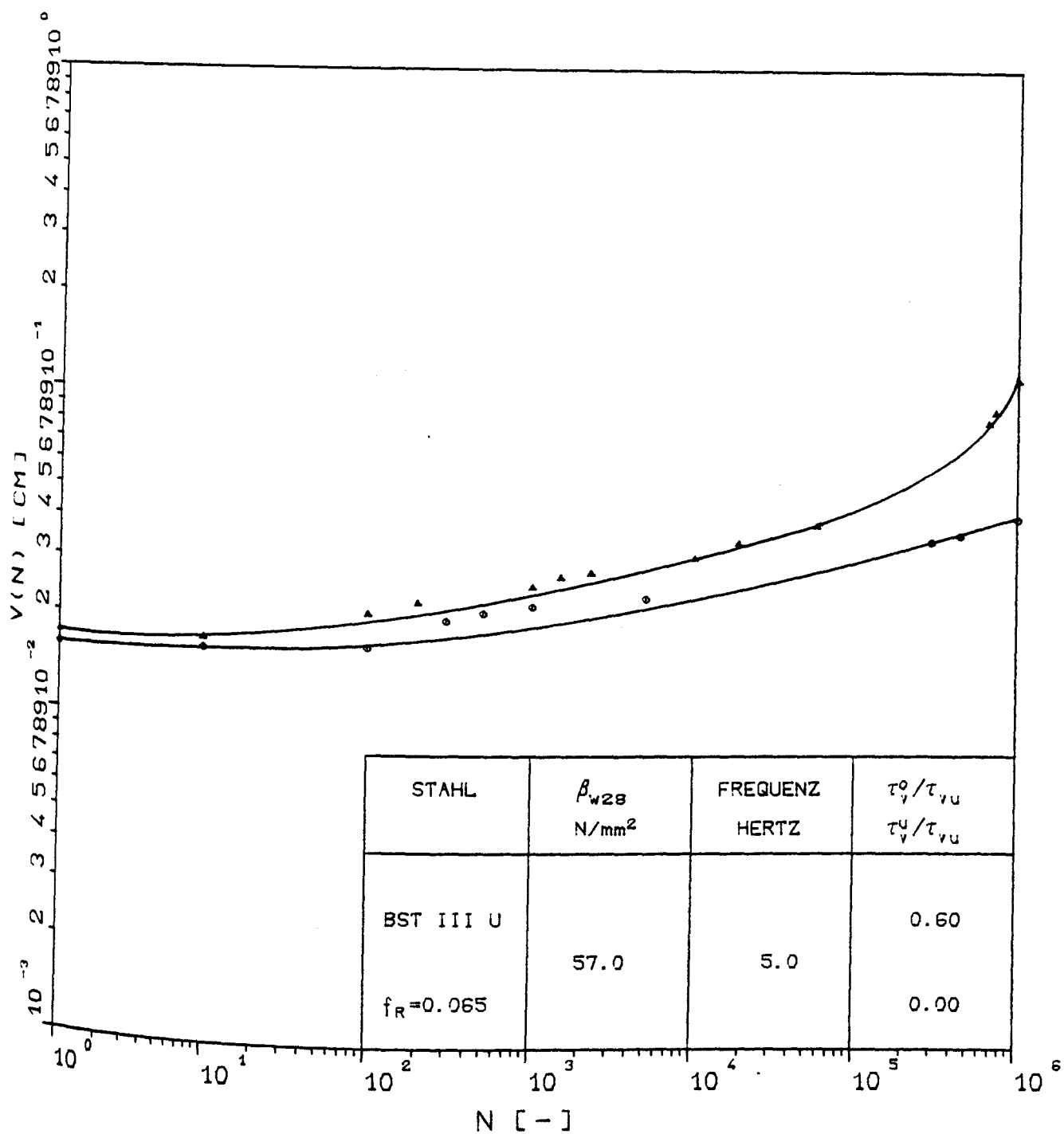
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ21.10 und AKZ21.16)



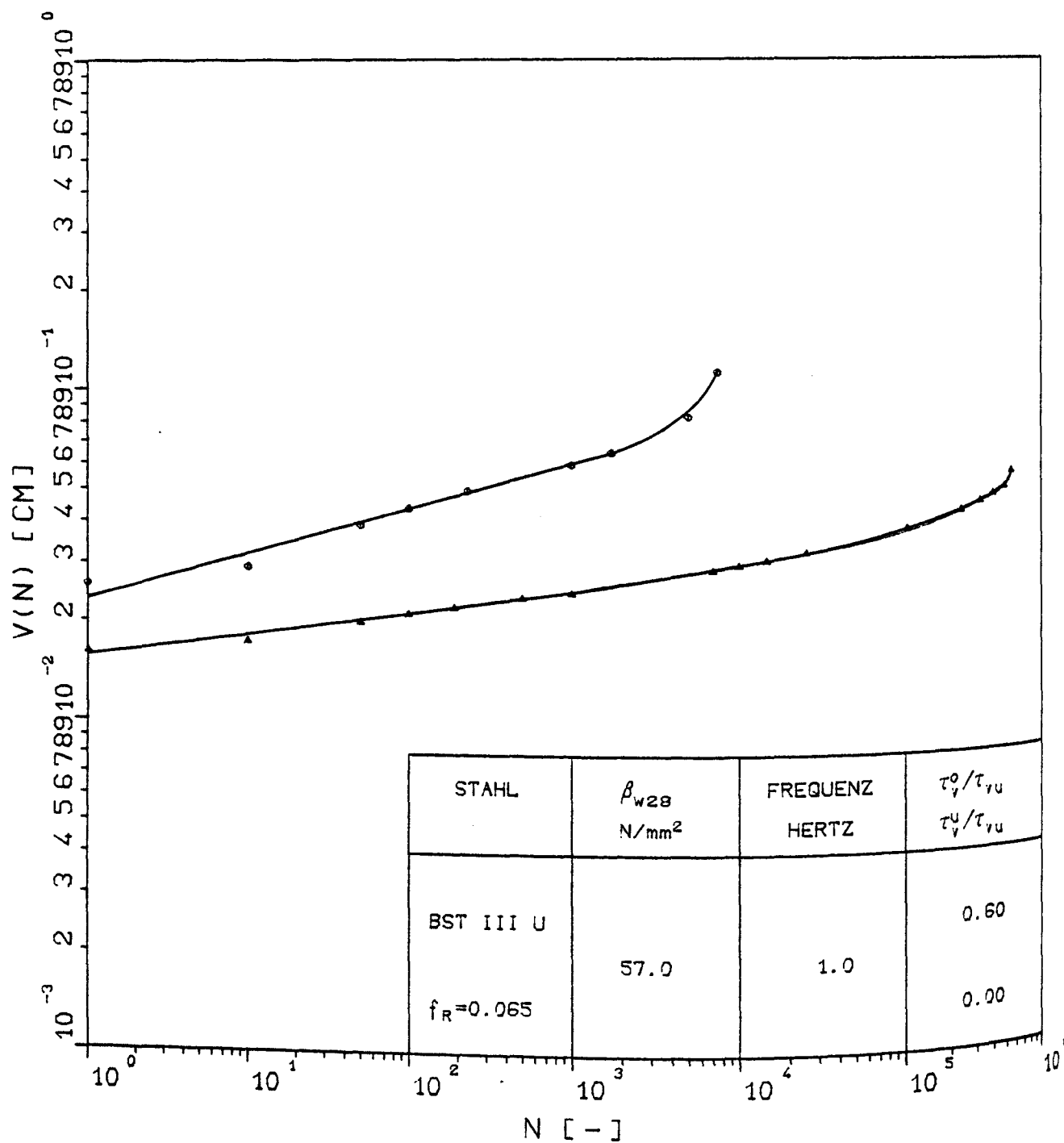
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ21.18 und AKZ21.20)



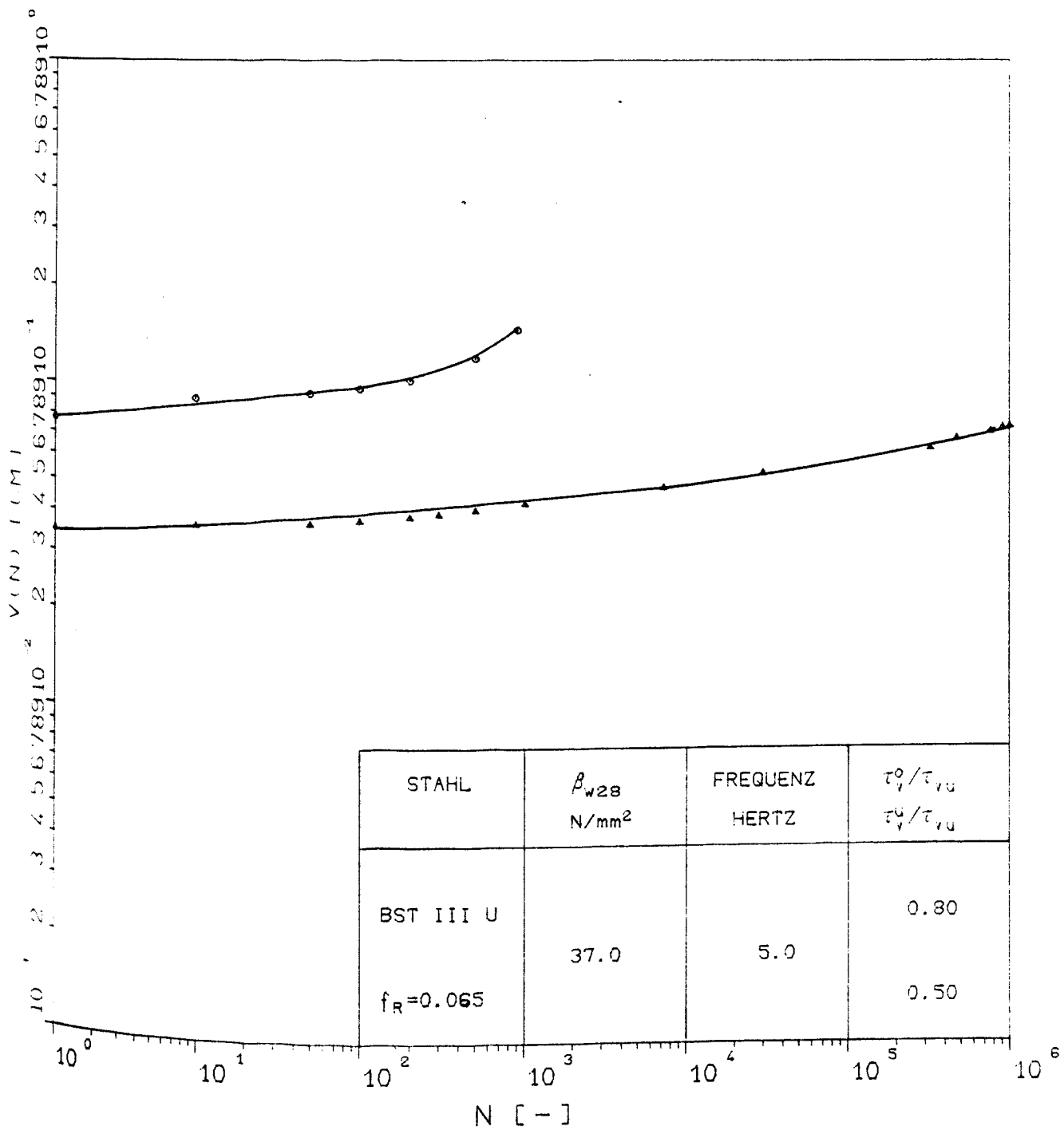
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ21.06 und AKZ21.12)



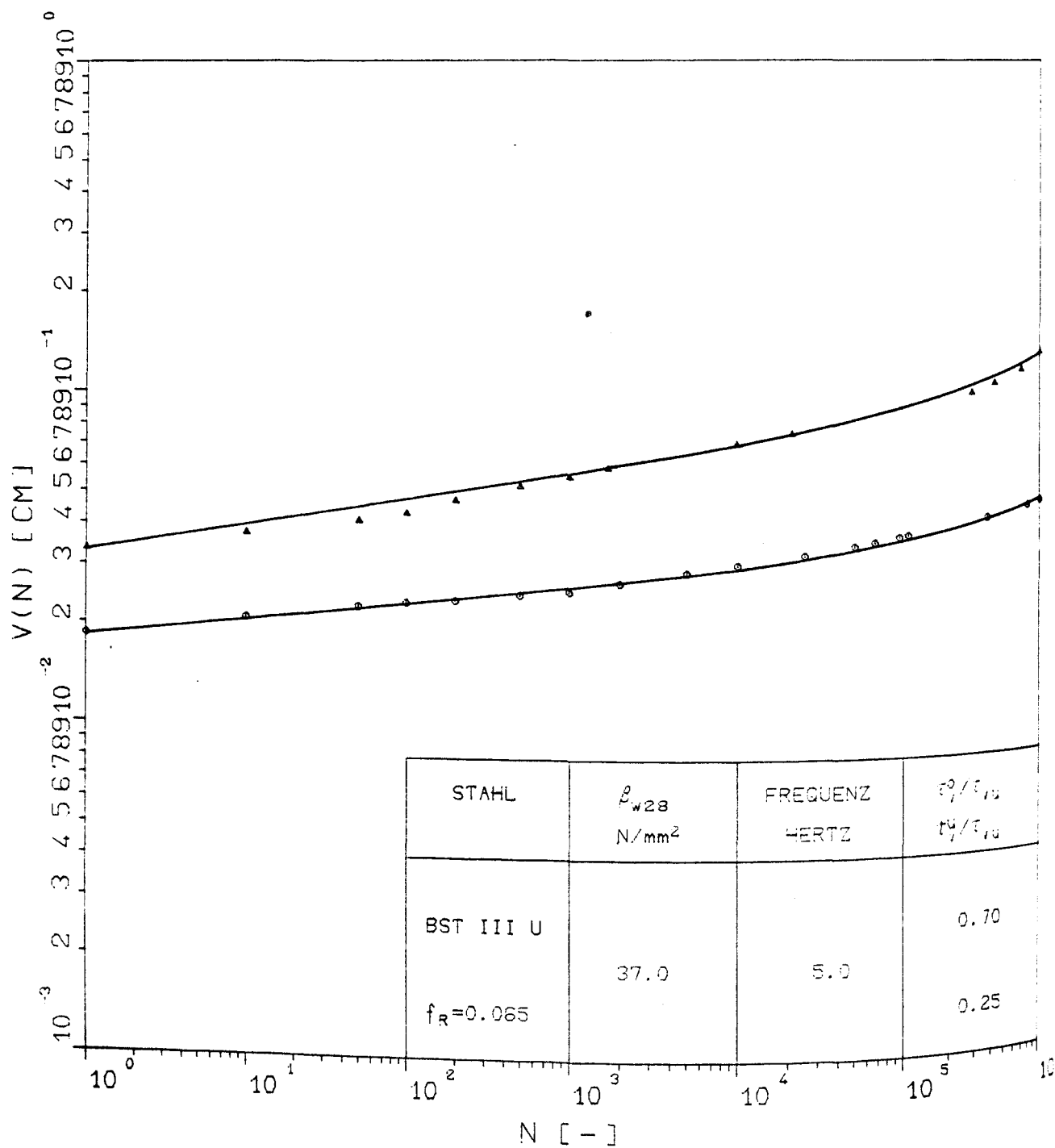
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ21.07 und AKZ21.19)



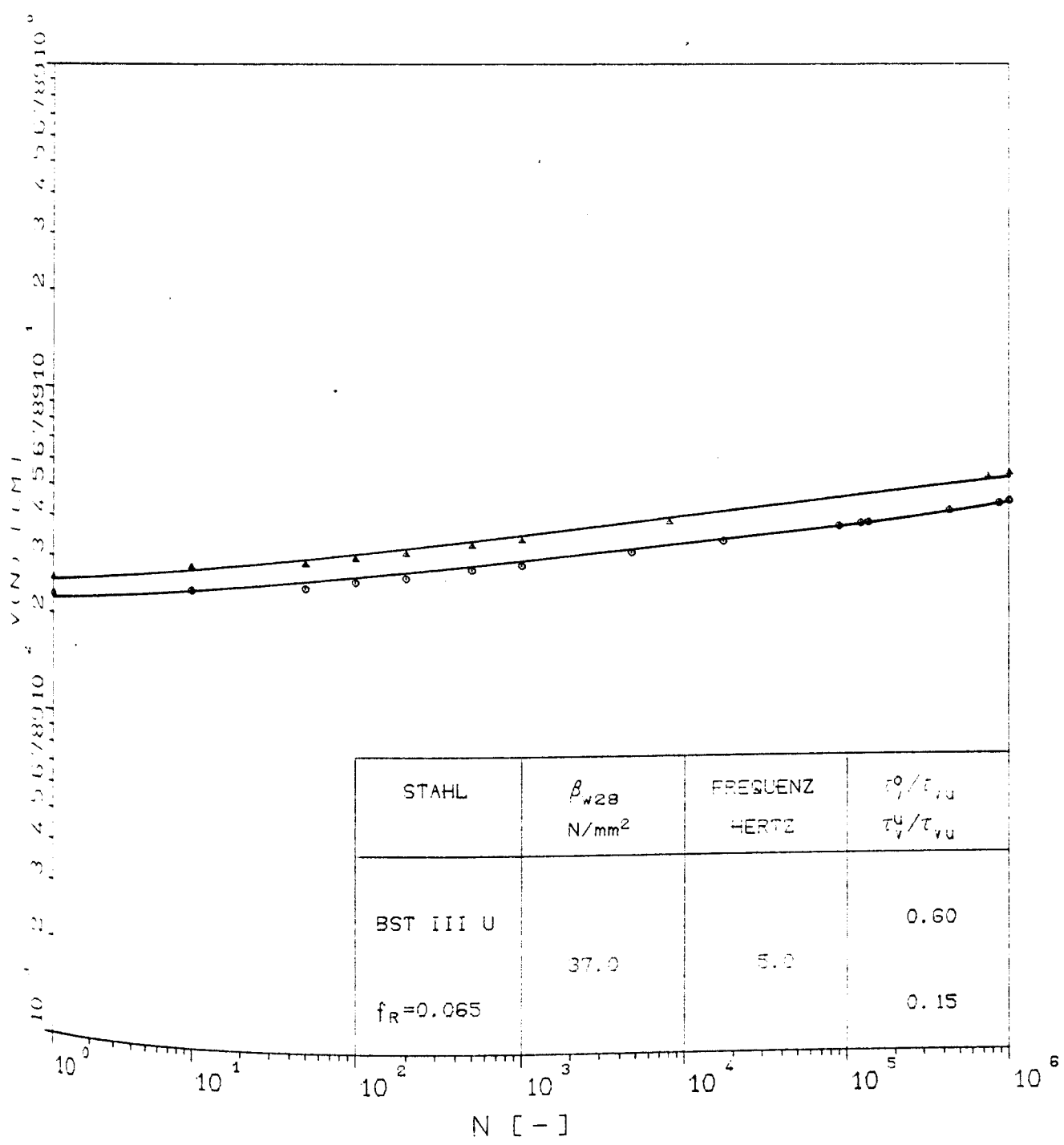
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ21.04 und AKZ21.08)



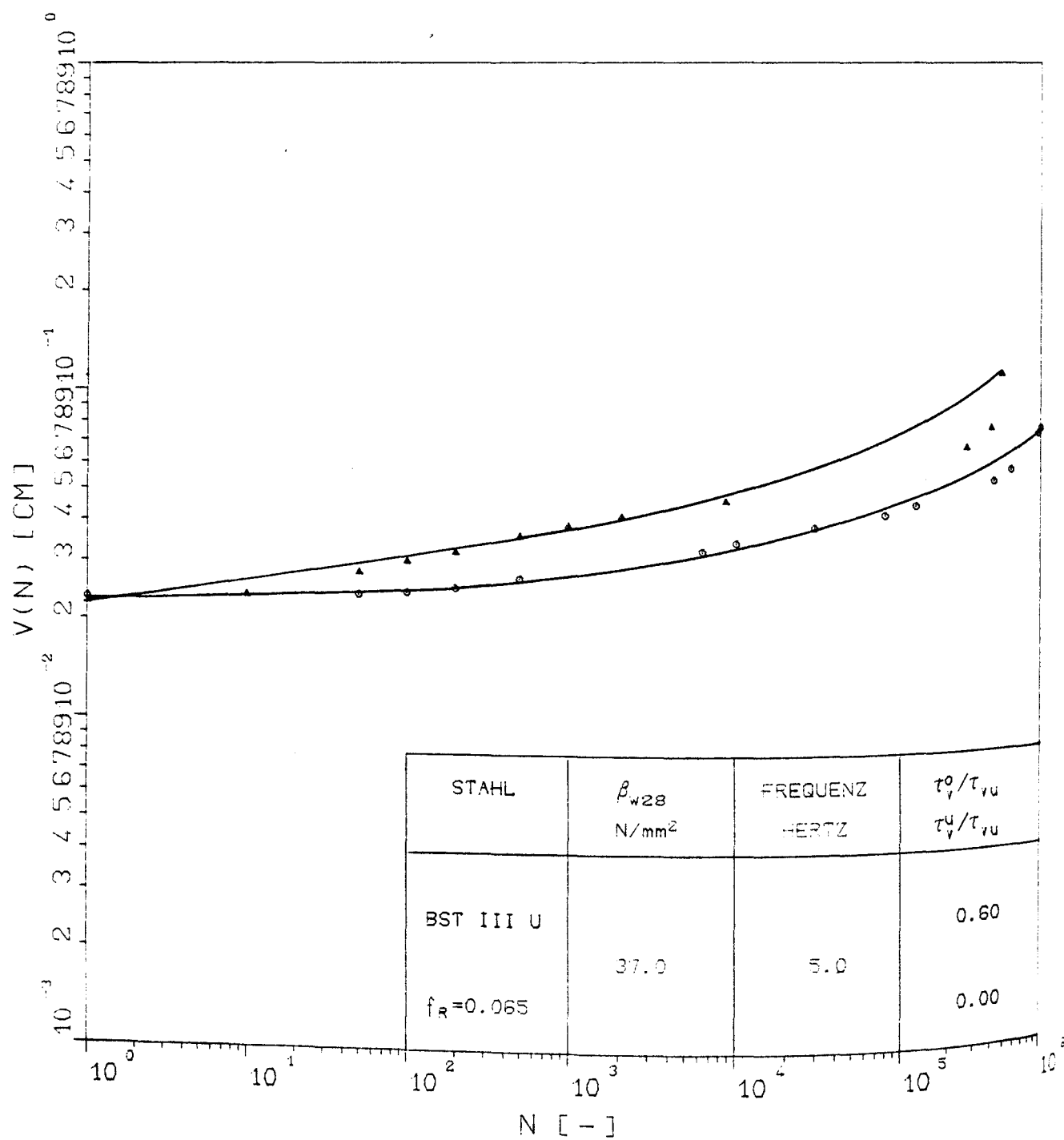
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ24.04 und AKZ24.05)



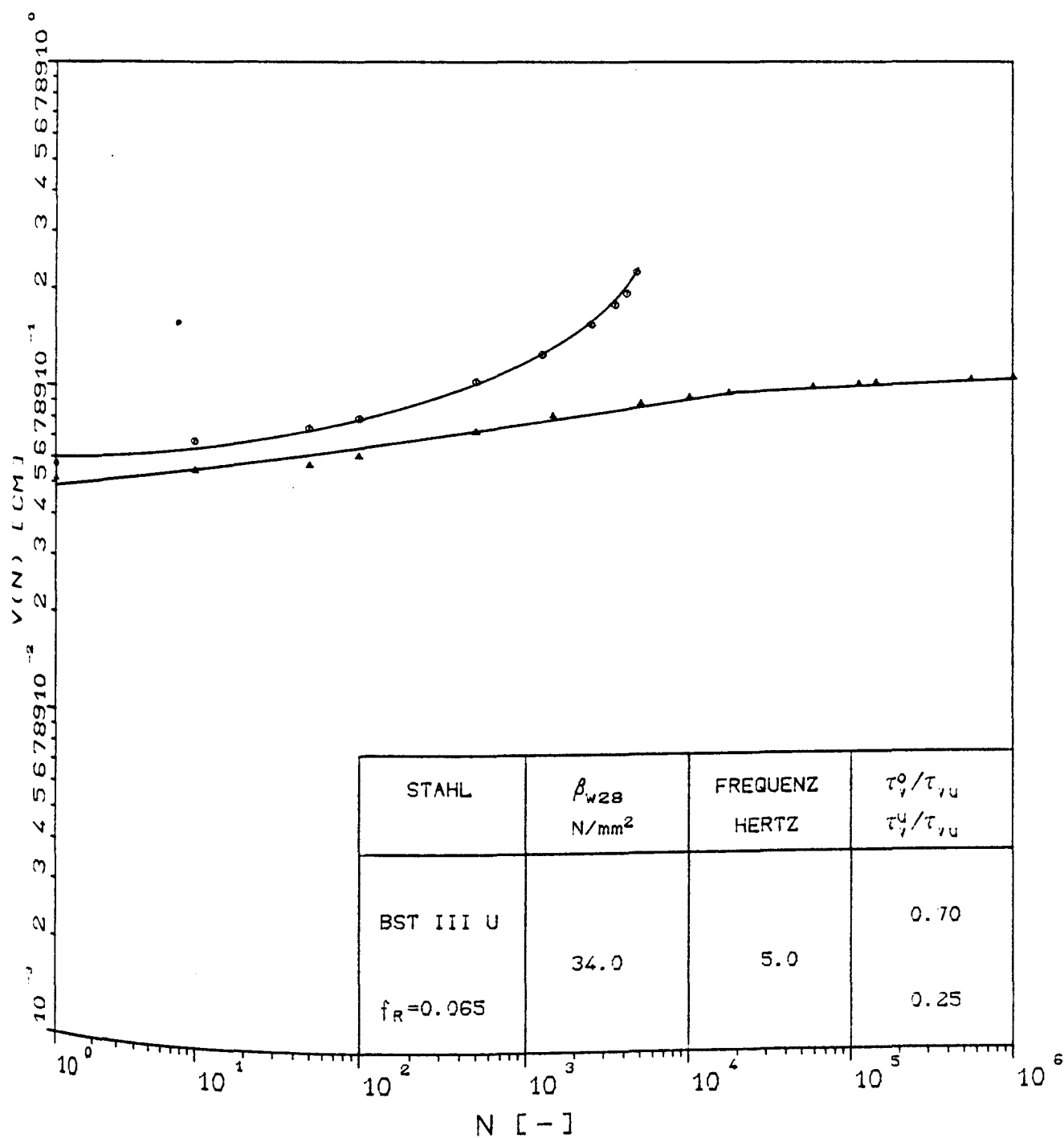
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ24.18 und AKZ24.19)



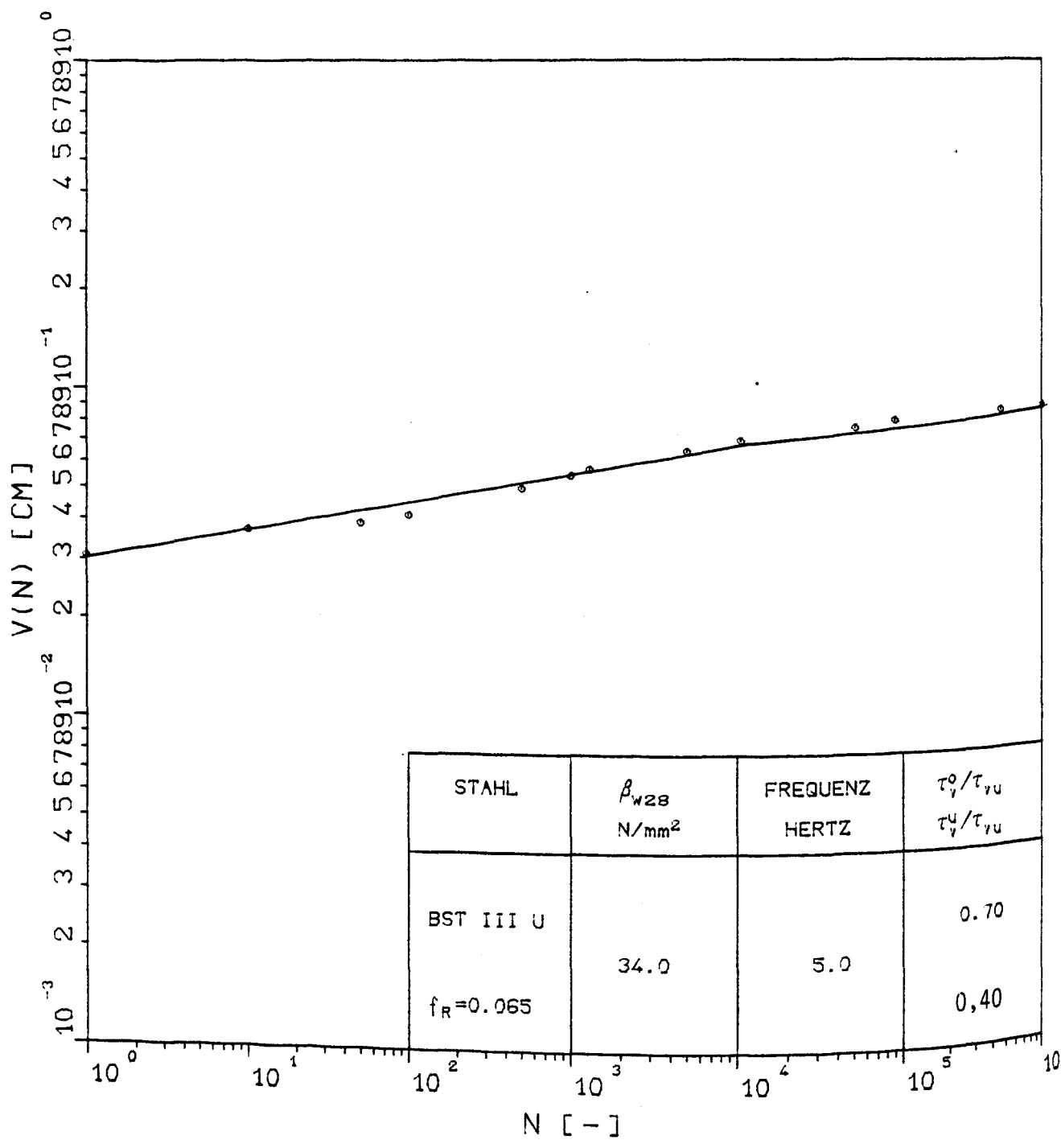
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ24.12 und AKZ24.15)



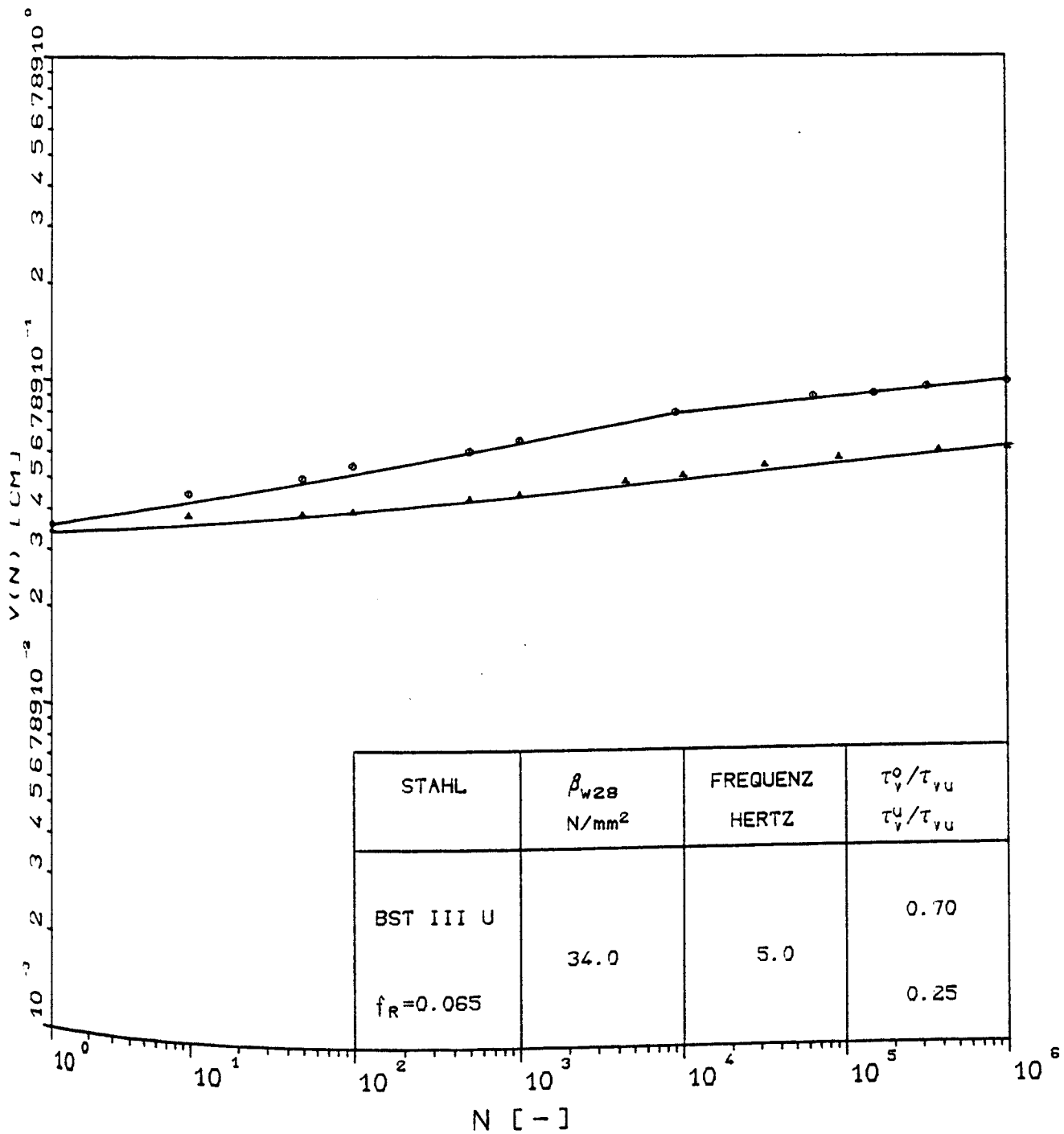
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ24.06 und AKZ24.11)



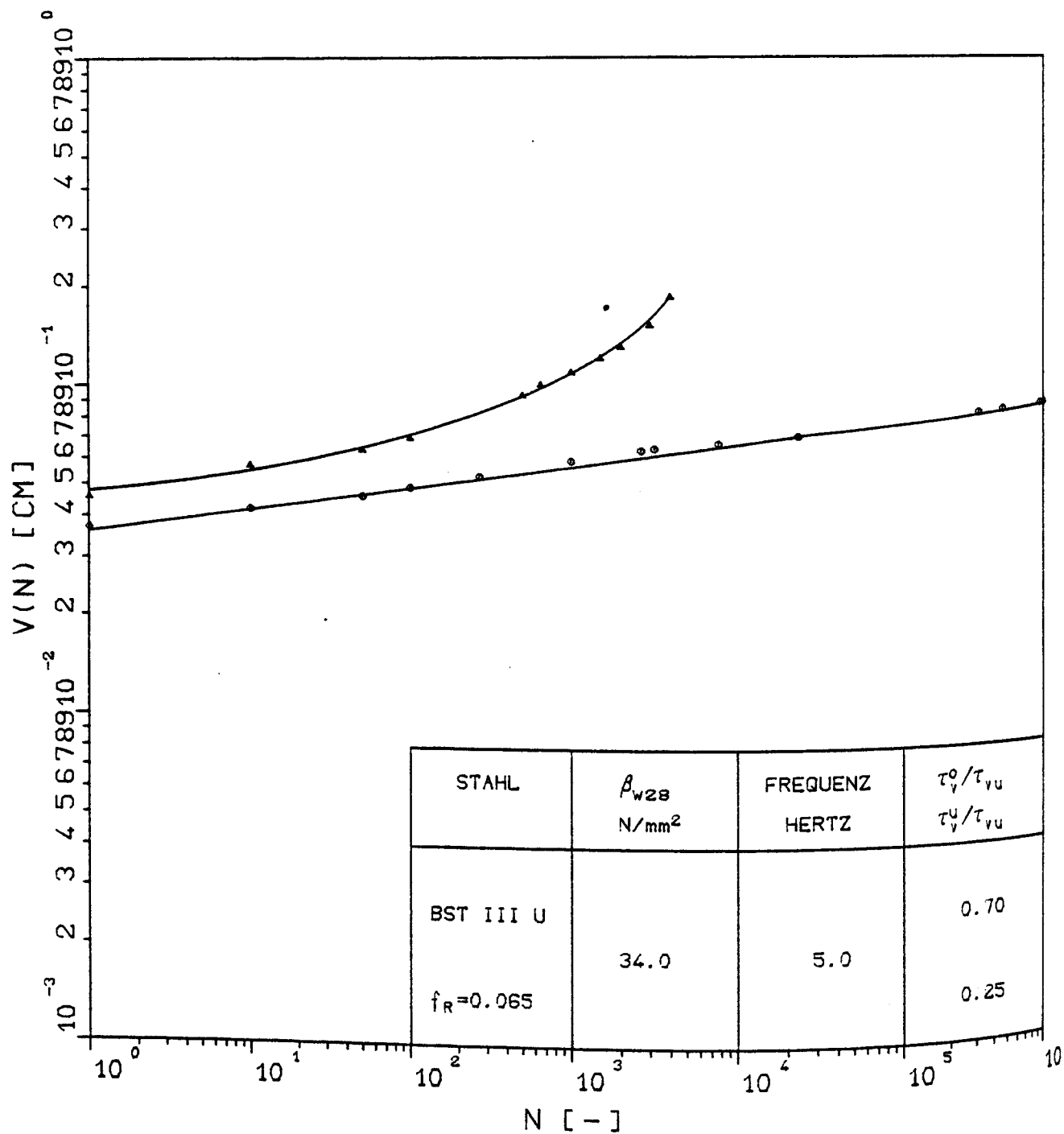
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ25.05 und AKZ25.06, Belastungsalter $T_0 = 7$ Tage)



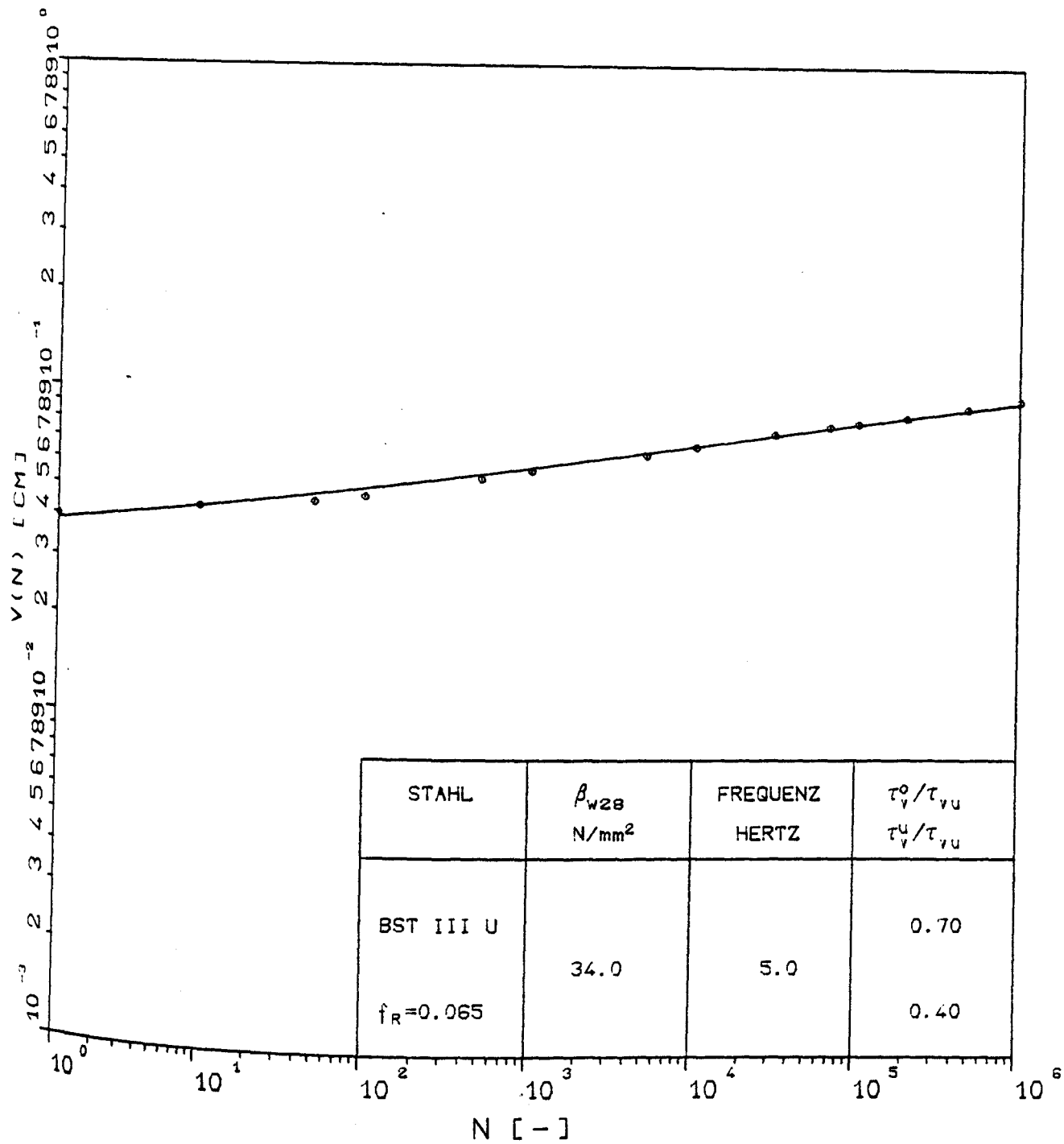
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuch AKZ25.08, Bealstungsalter $T_0 = 7$ Tage)



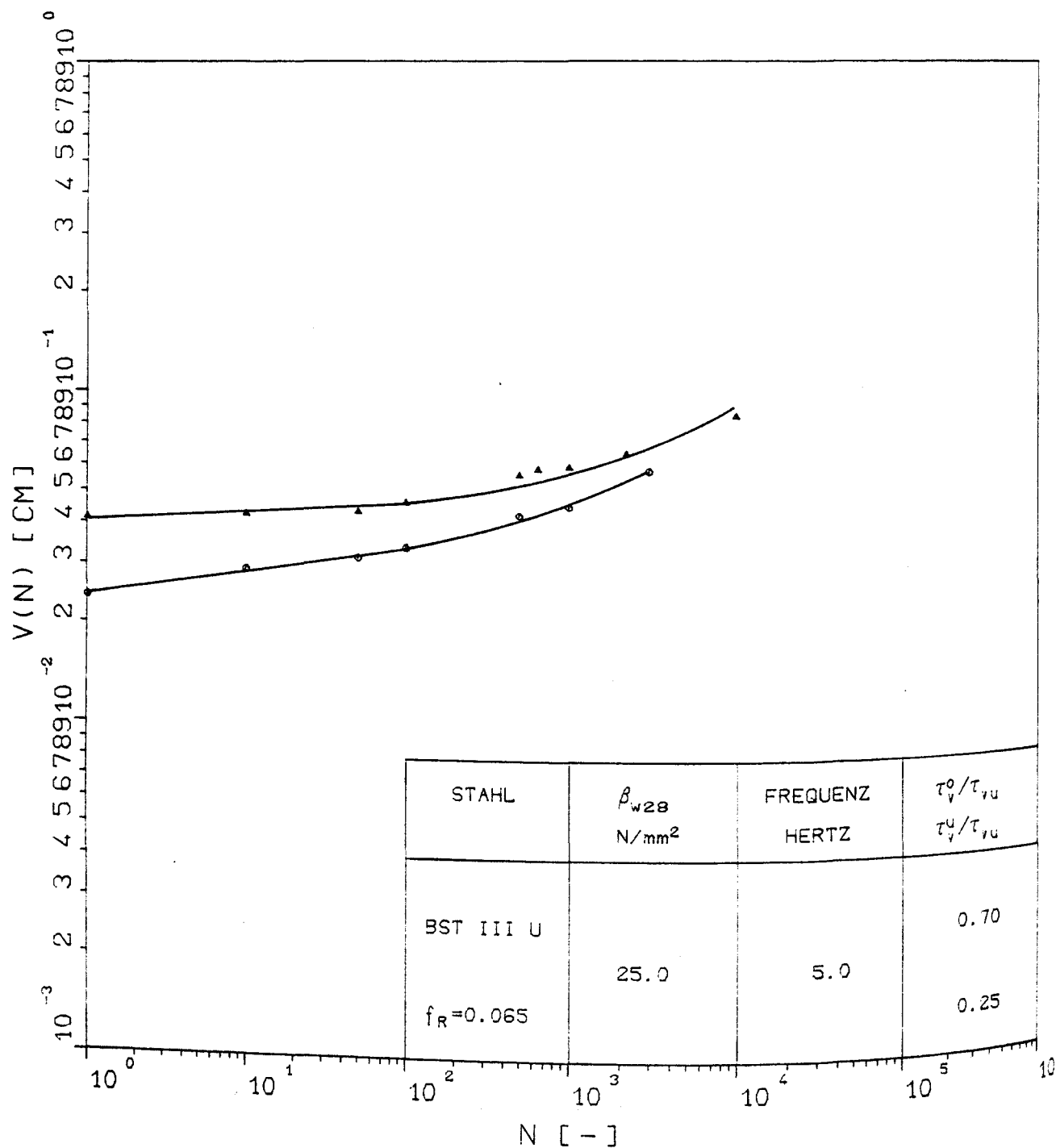
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ25.07 und AKZ25.11, Belastungsalter $T_0 = 14$ Tage)



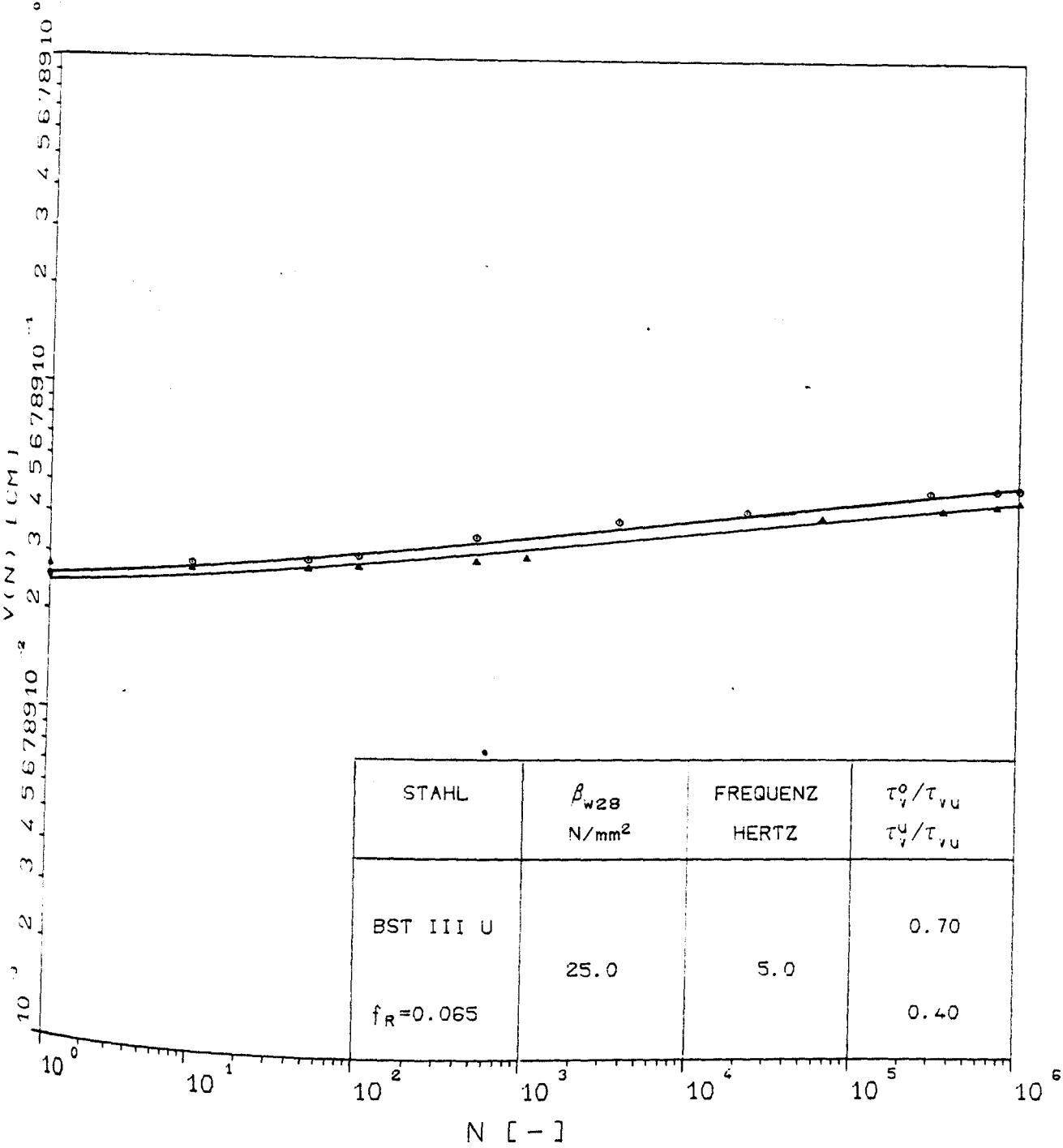
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKZ25.- und AKZ25.20, Belastungsalter $T_0 = 28$ Tage)



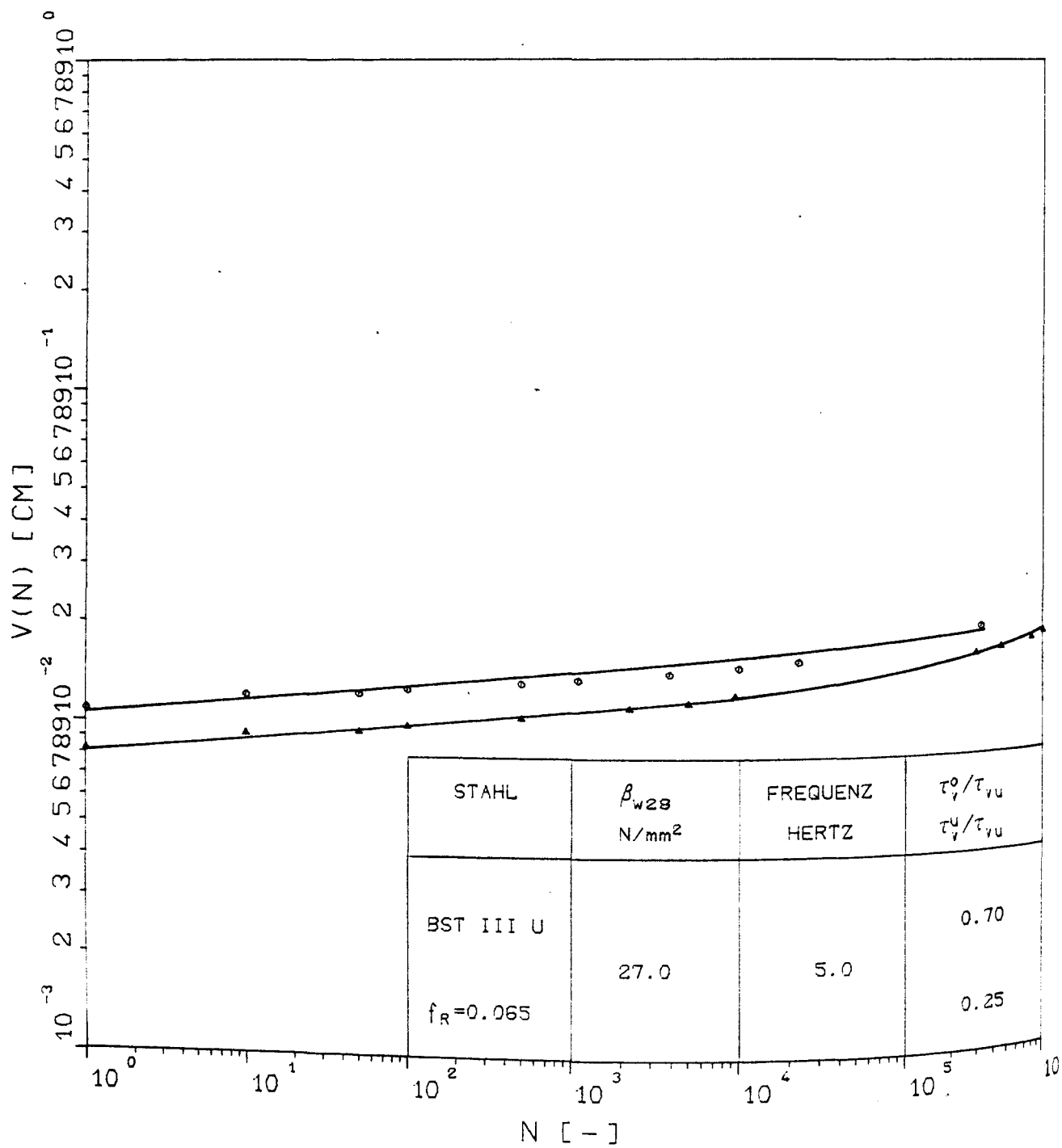
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuch AKZ25.19,
Belastungsalter $T_0 = 28$ Tage)



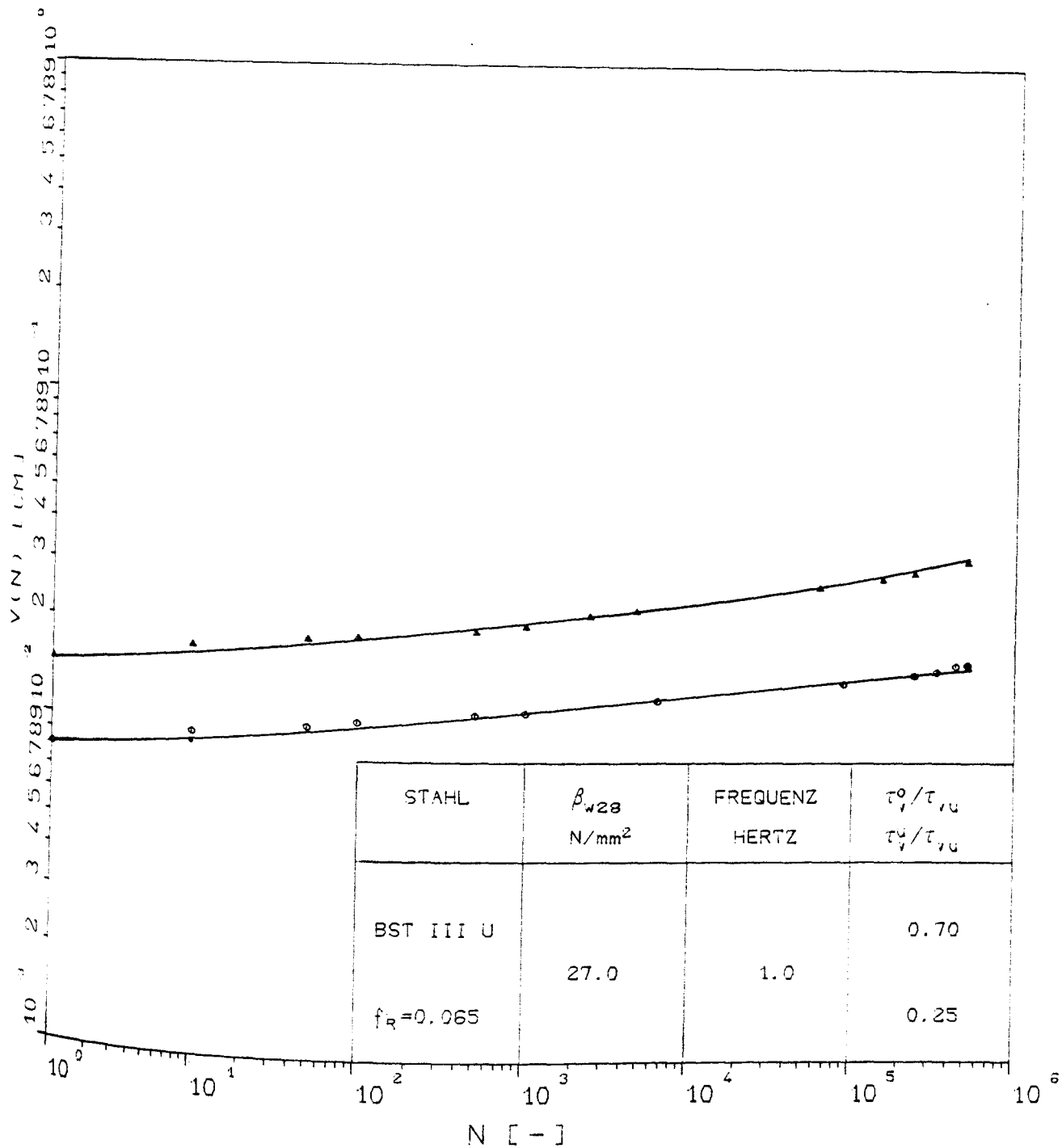
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKE6.02 und AKE6.03, Randlage 1 d_s)



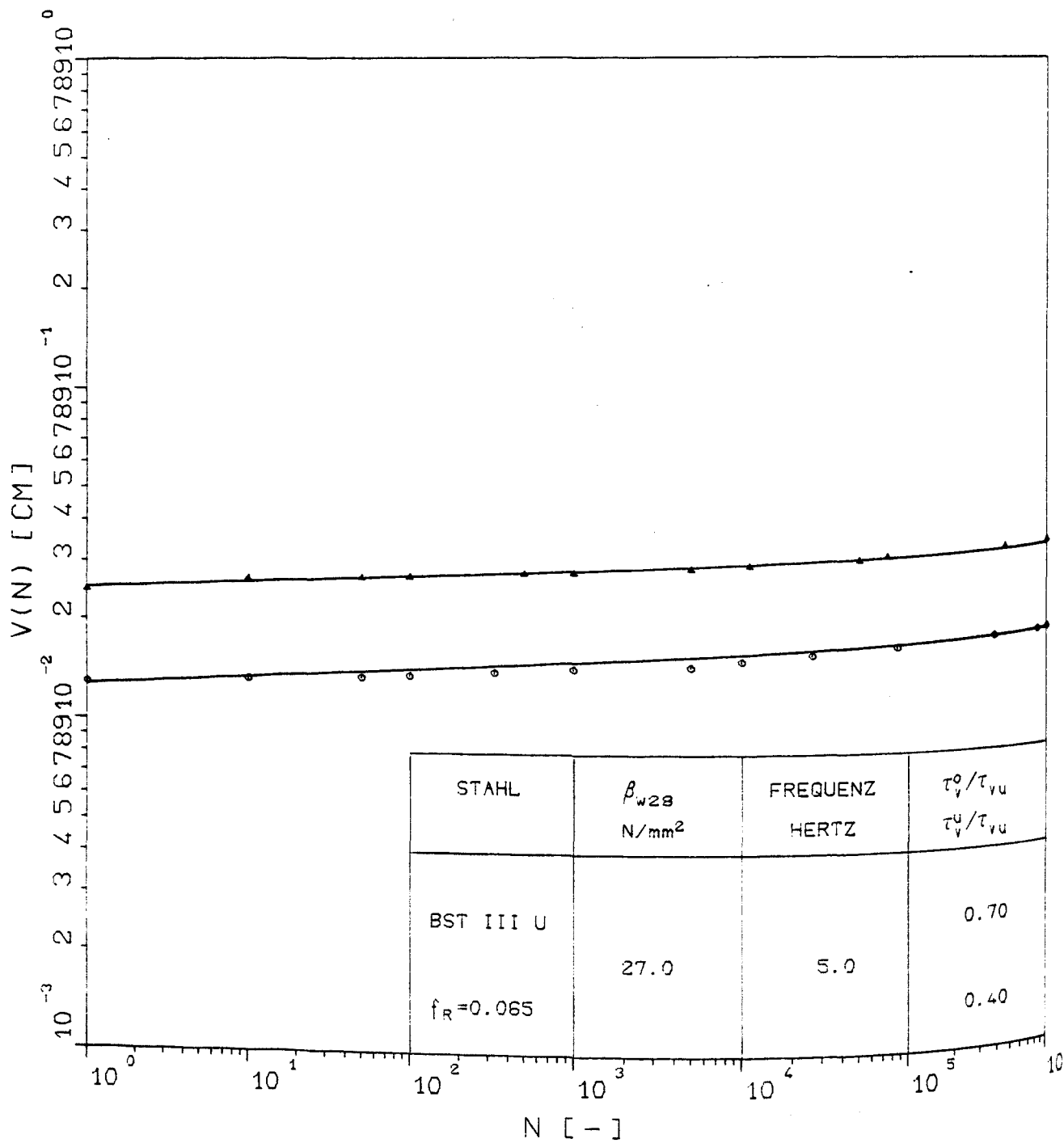
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKE6.05 und AKE6.06, Randlage 1 d_s)



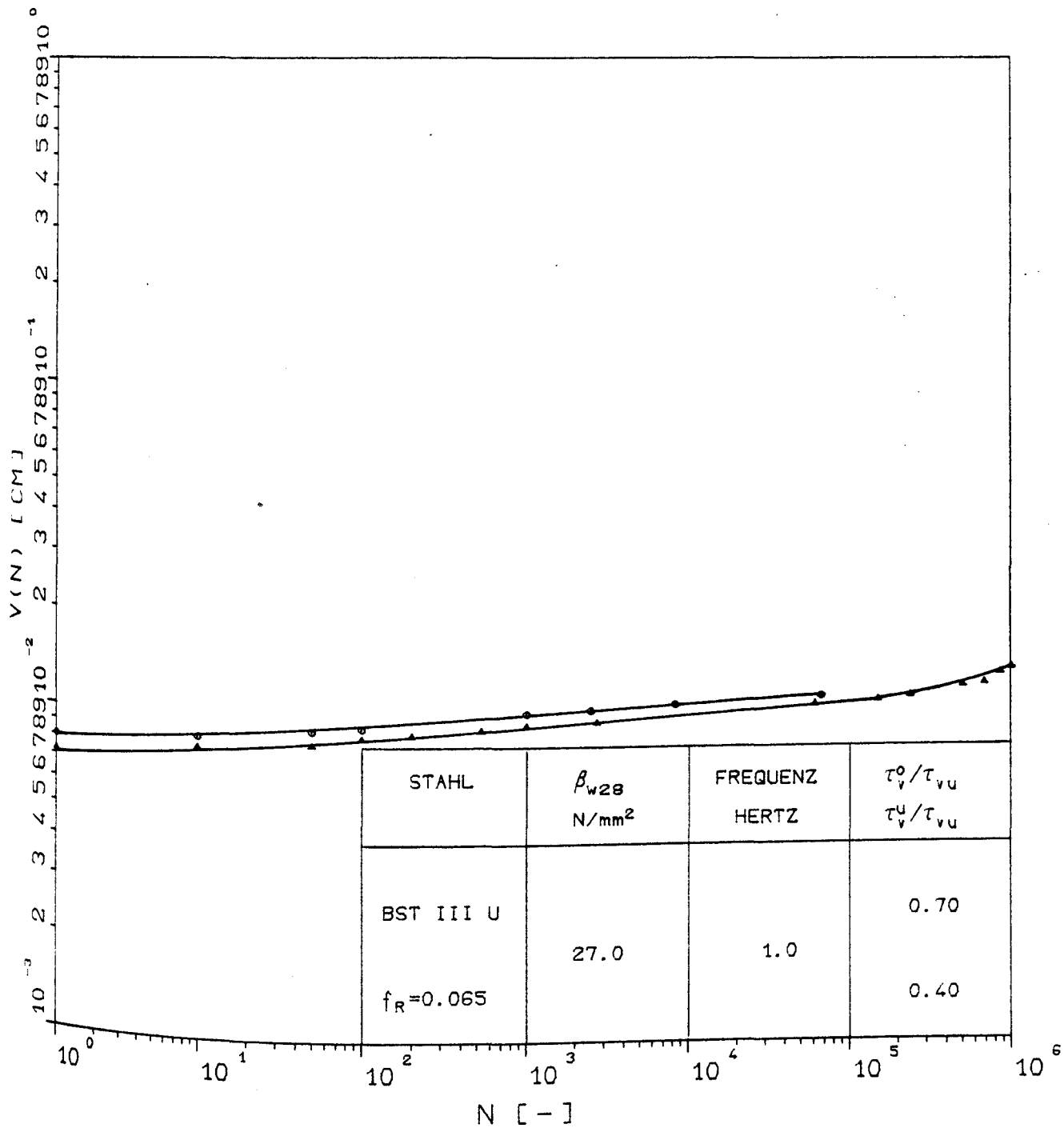
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKE8.04 und AKE8.09, Ecklage 2 d_s)



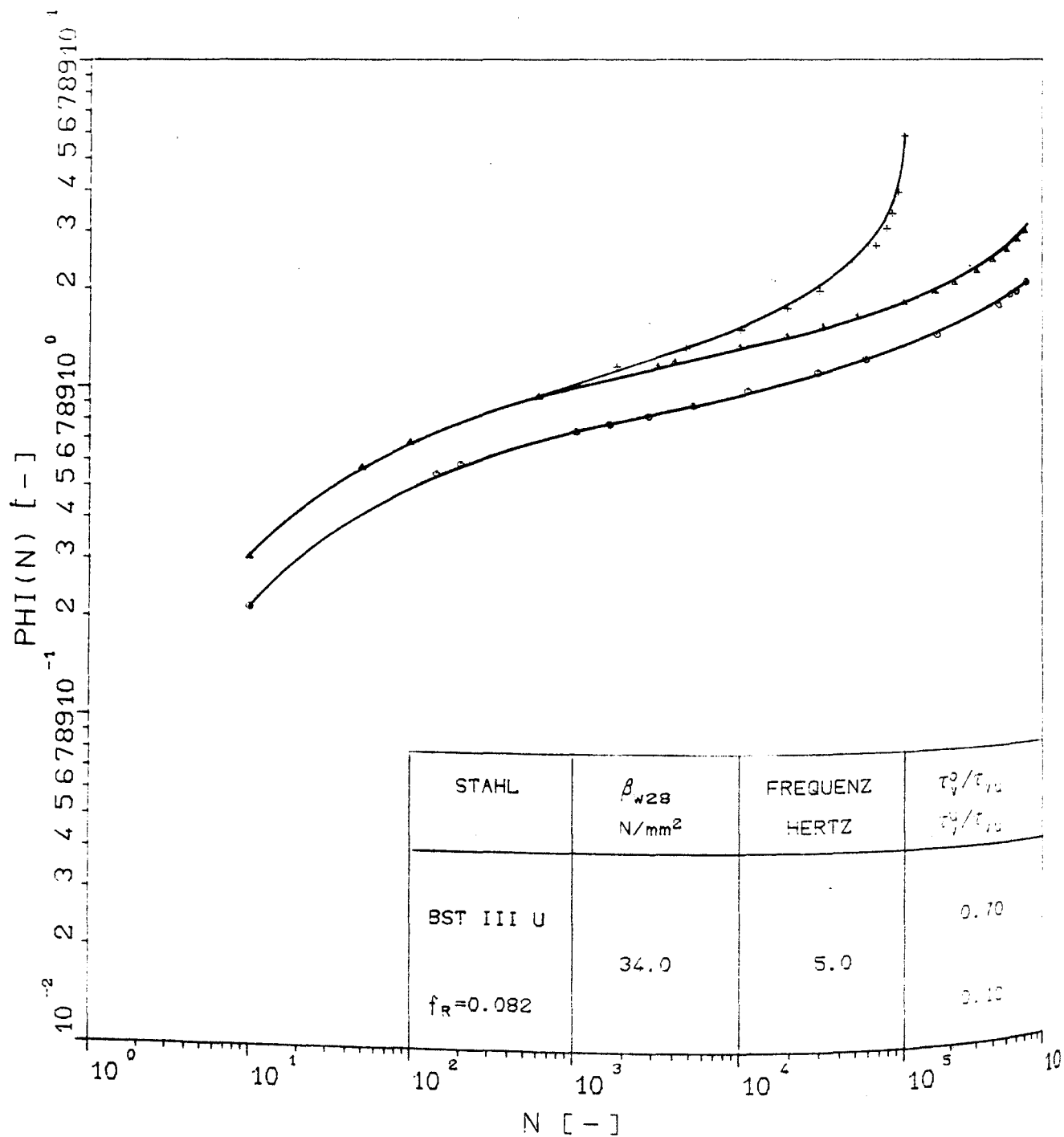
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKE8.01 und AKE8.07, Ecklage 2 d_s)



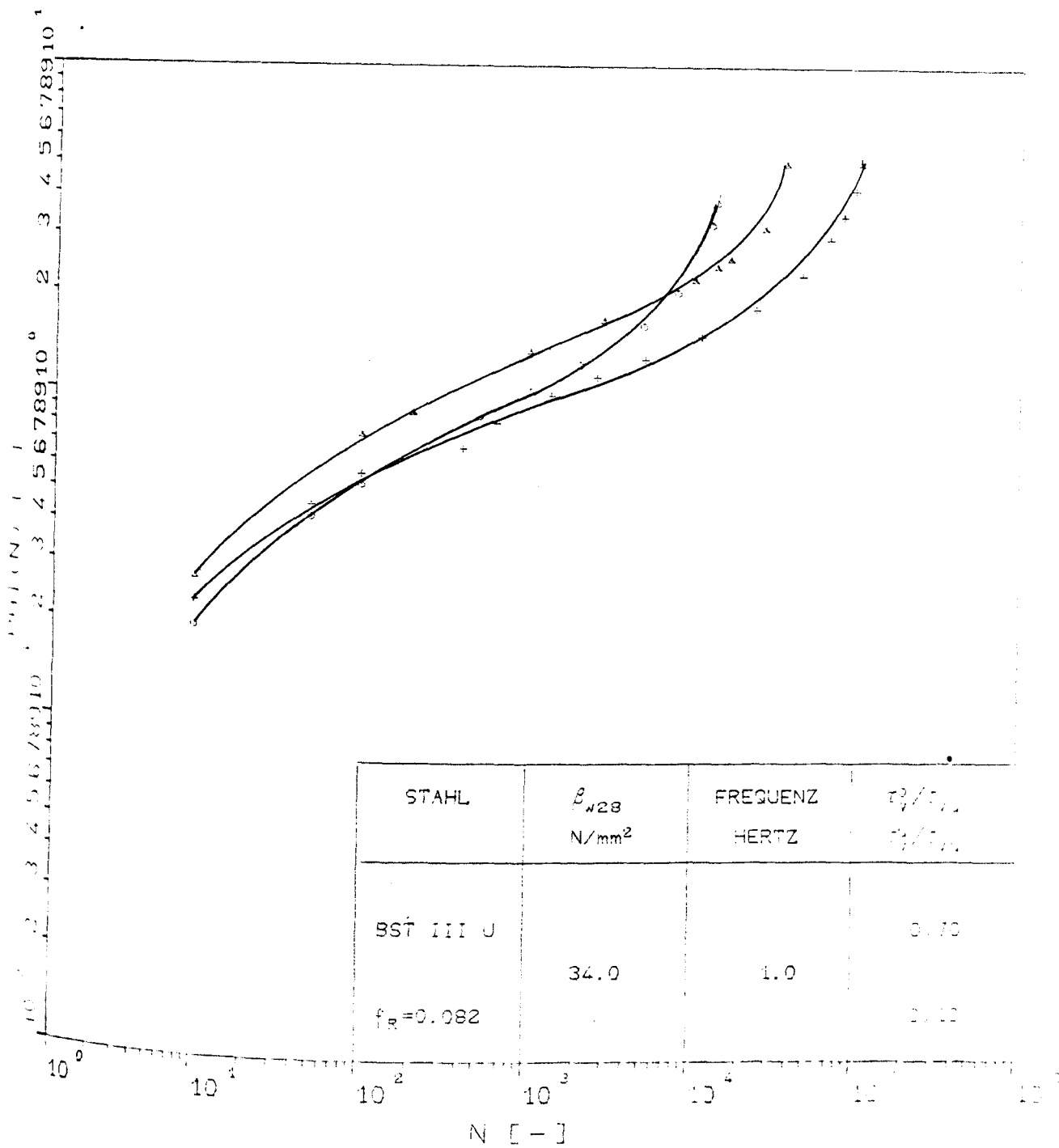
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKE8.03 und AKE8.14, Ecklage 2 d_s)



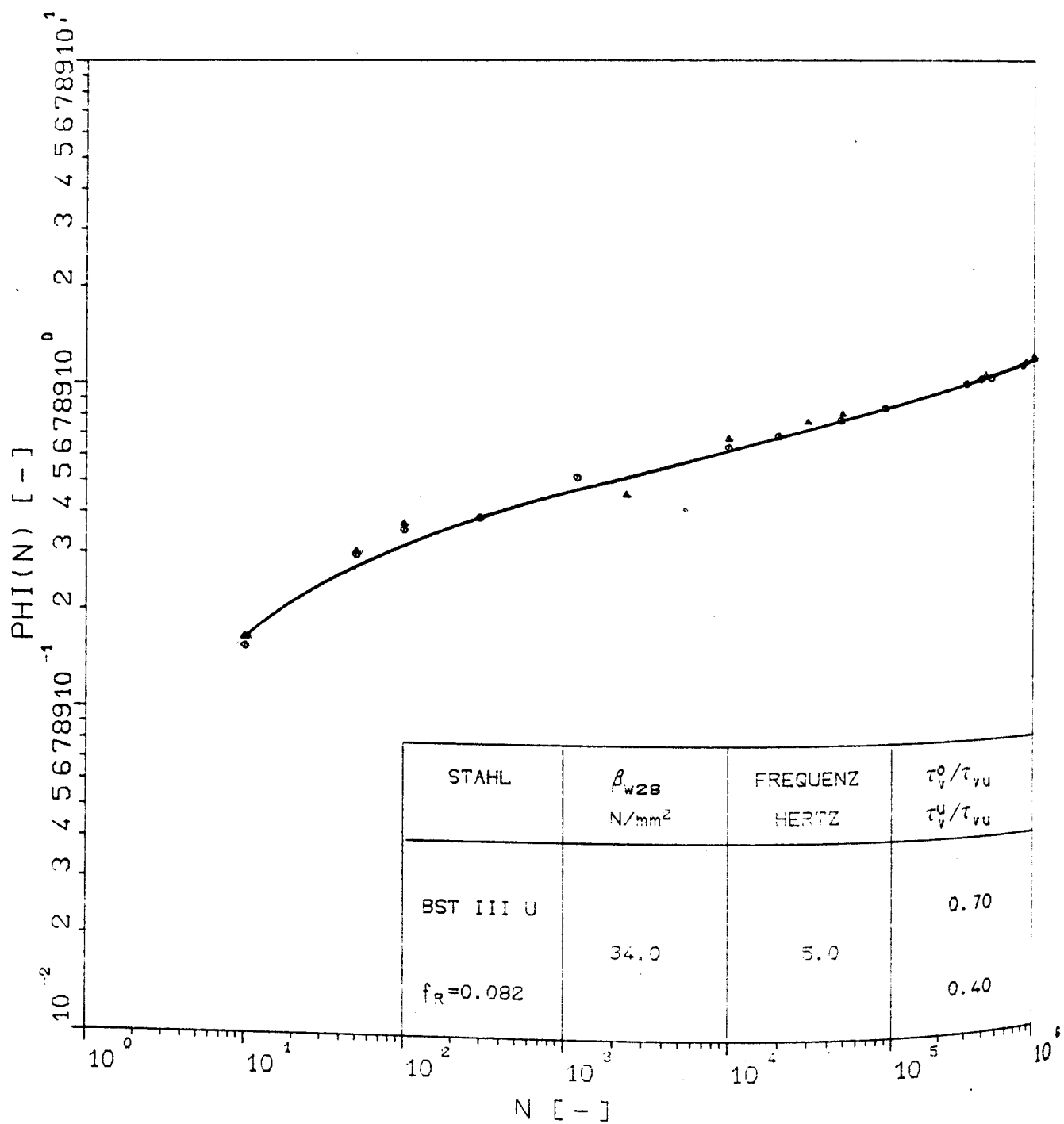
Verschiebungszunahme in Abhängigkeit von der Lastspielzahl (Versuche AKE8.02 und AKE8.10, Ecklage 2 d_s)



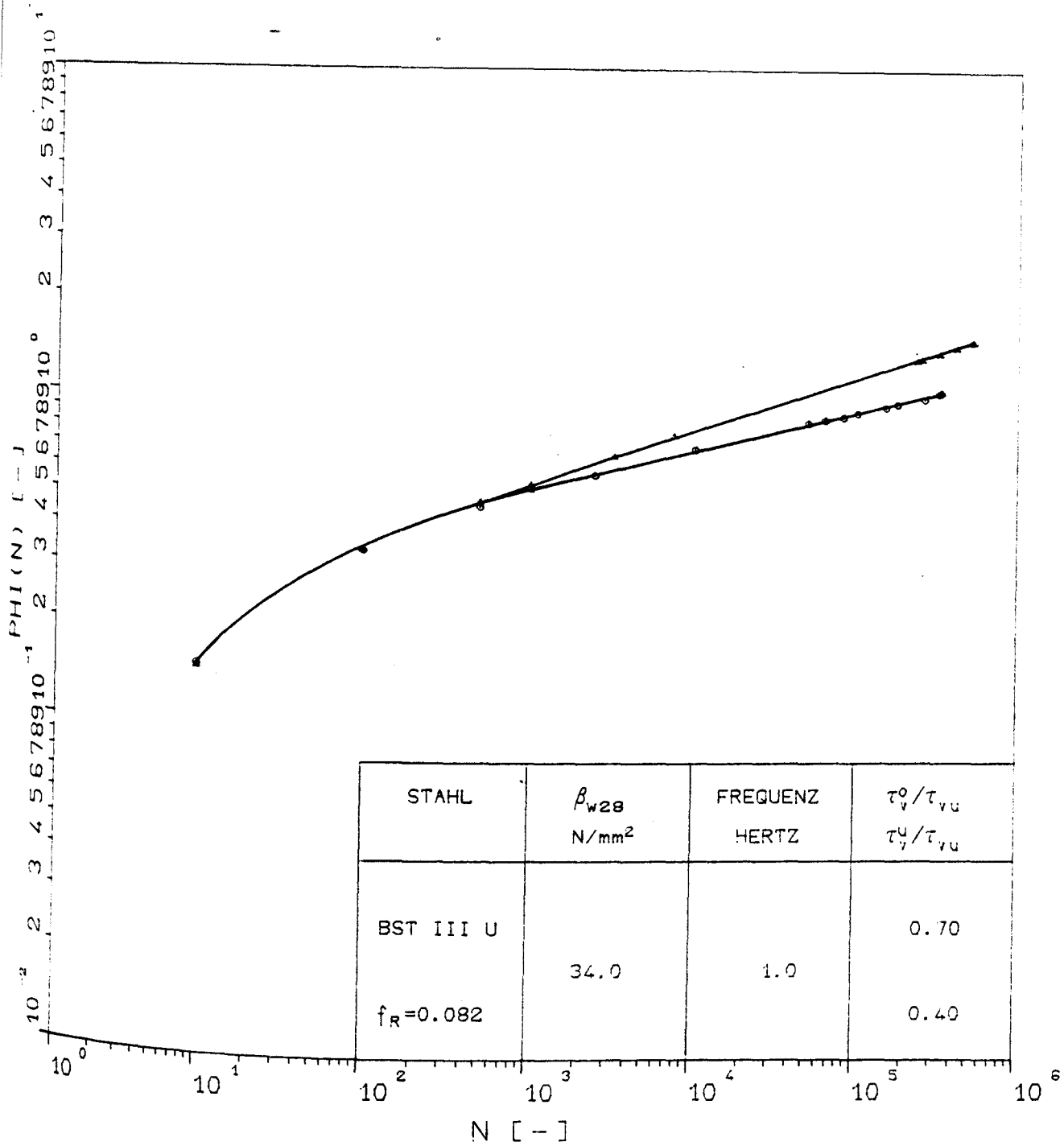
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche
AKZ10.04, AKZ10.07 und AKZ10.15



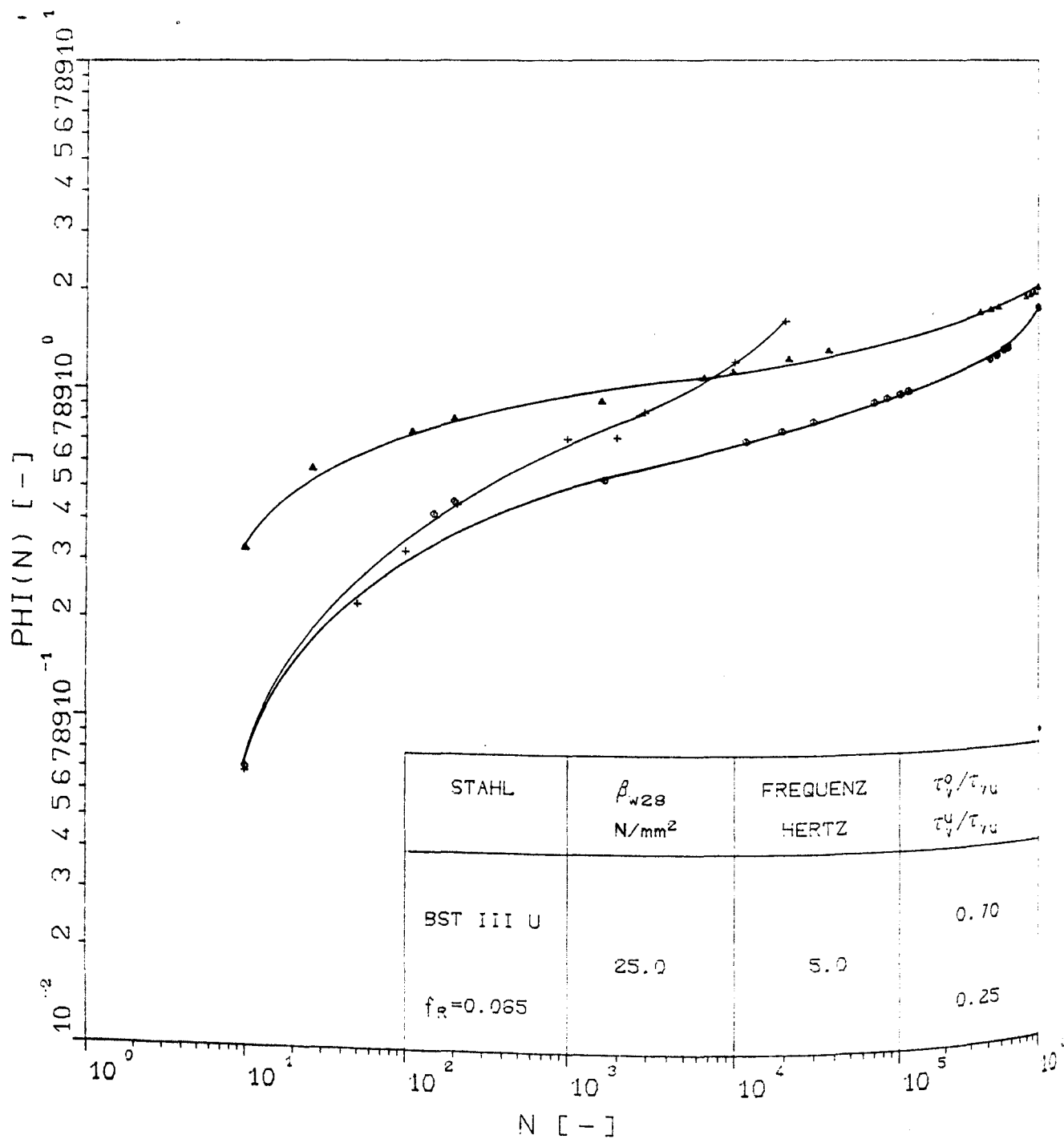
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche AKZ10.09, AKZ10.19 und AKZ10.20



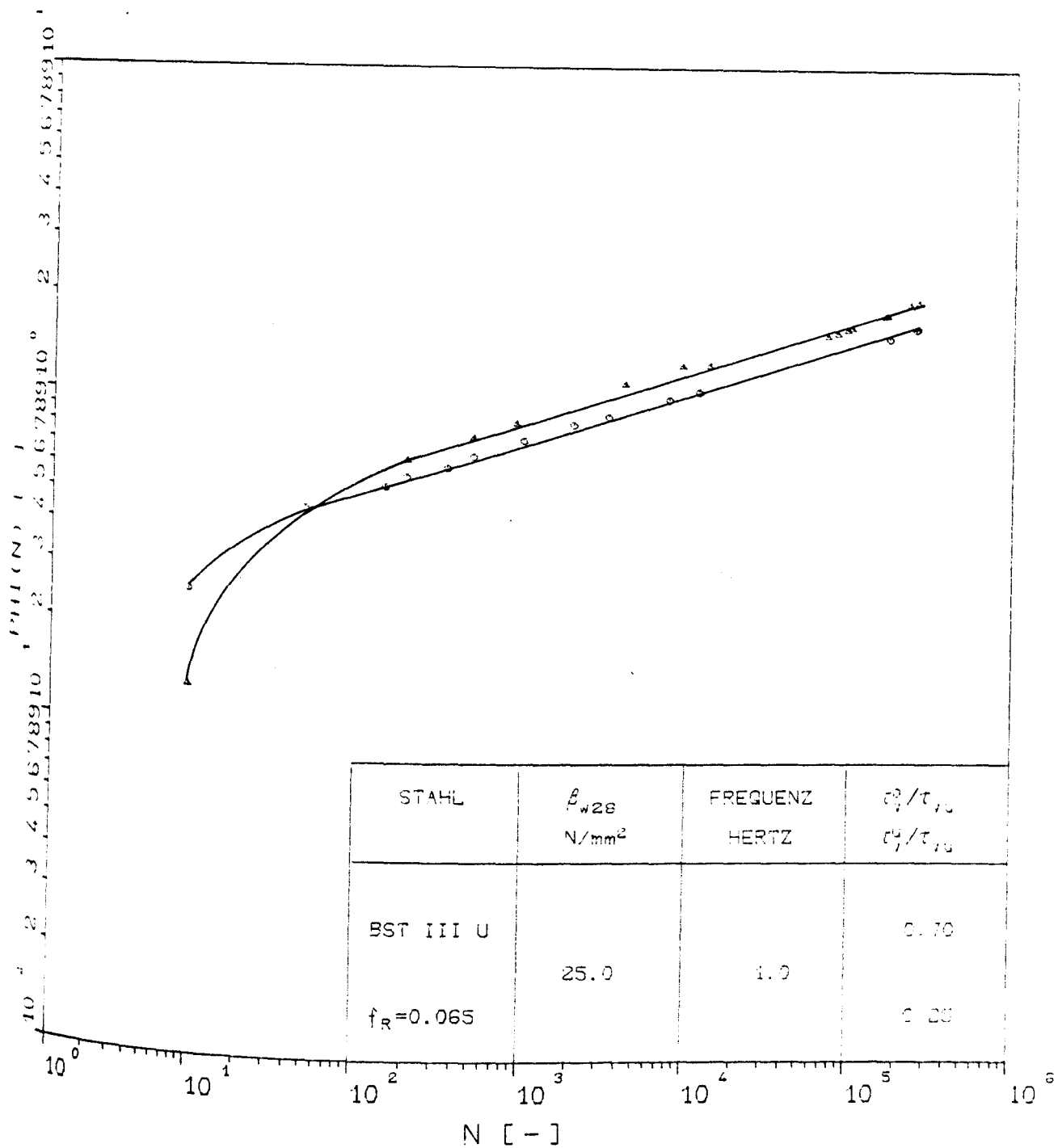
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche AKZ10.17 und AKZ10.18



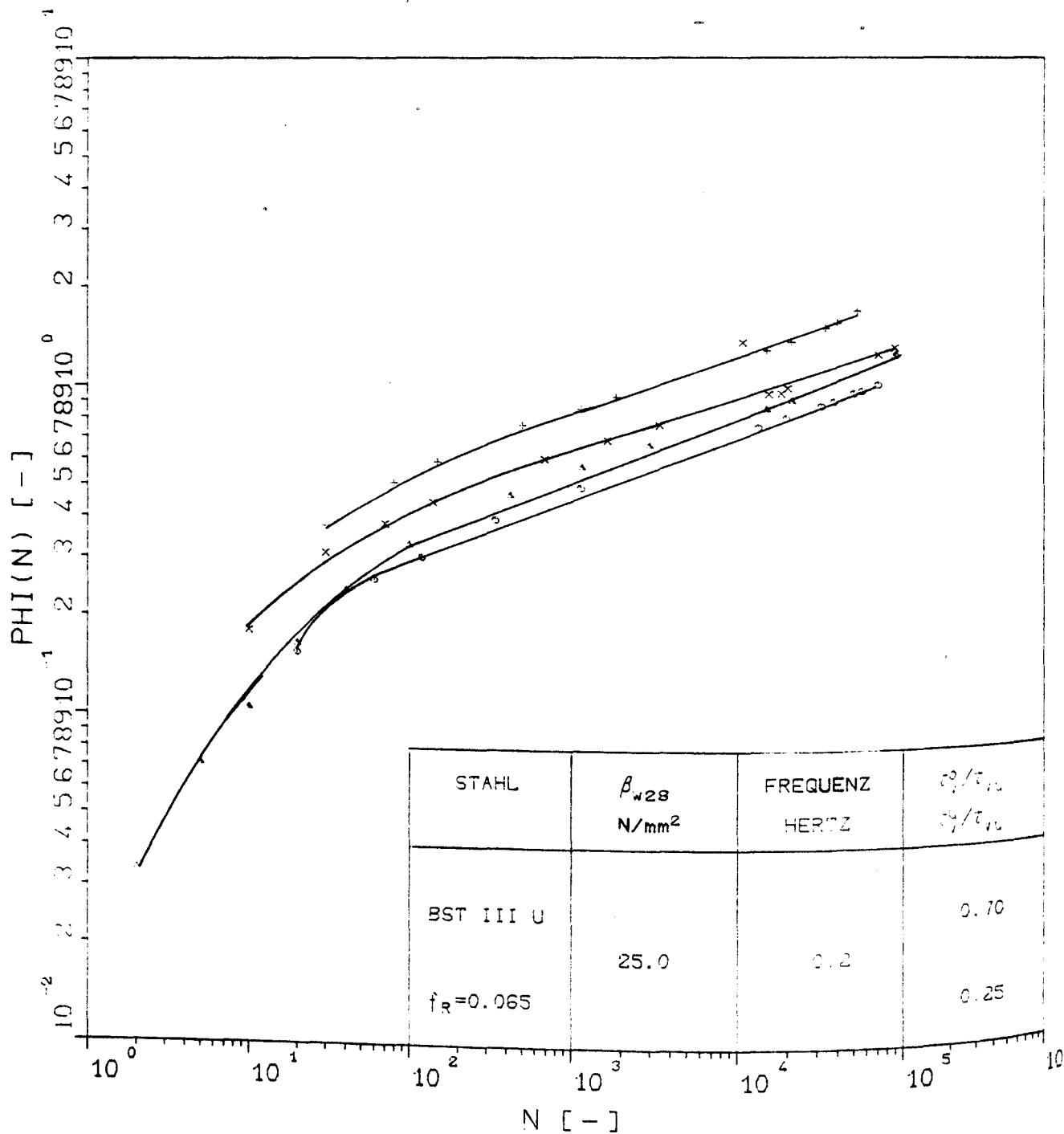
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche AKZ10.08 und AKZ10.10



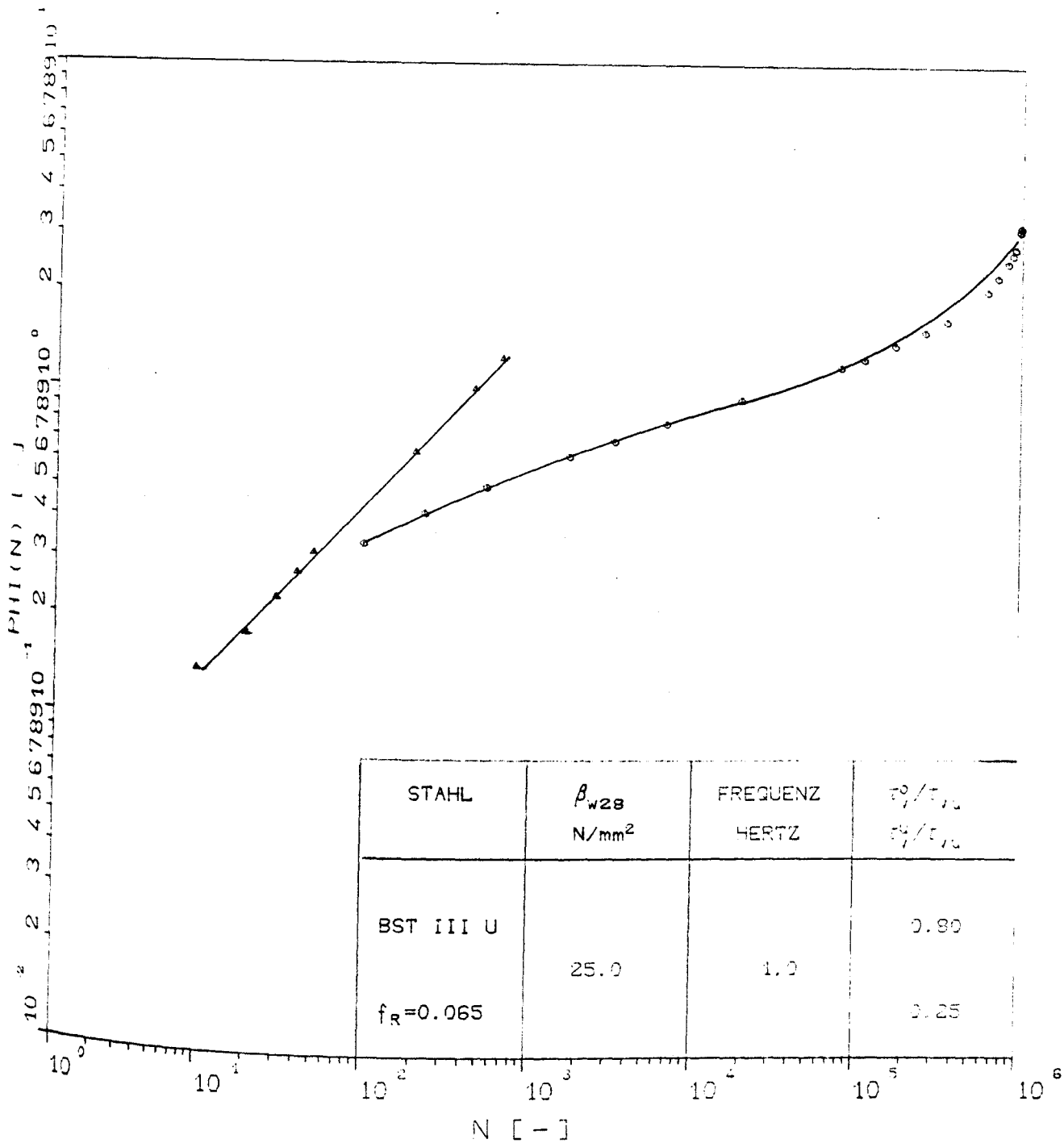
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche
AKZ12.11, AKZ12.15 und AKZ12.18



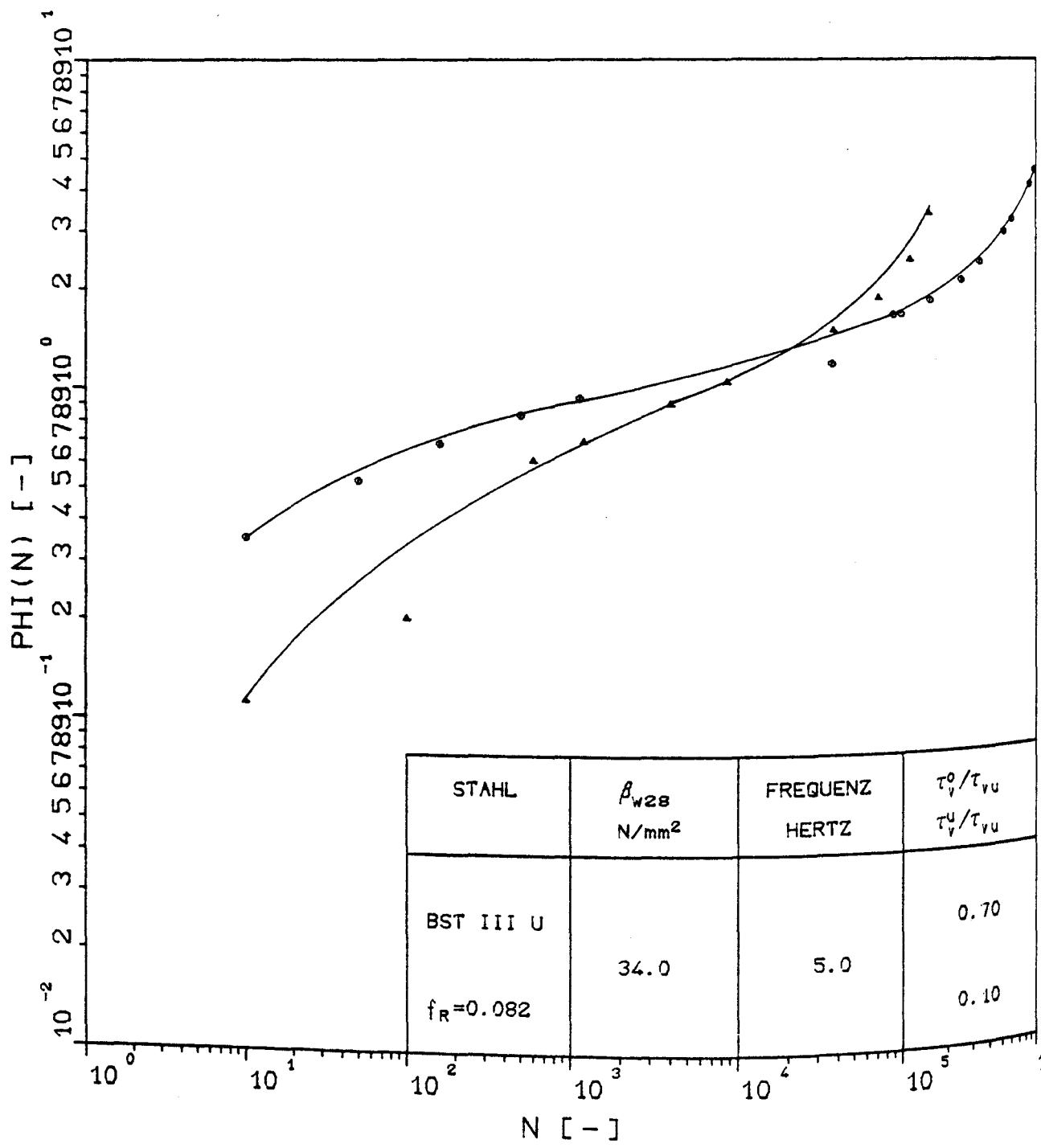
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche
AKZ12.07 und AKZ12.14



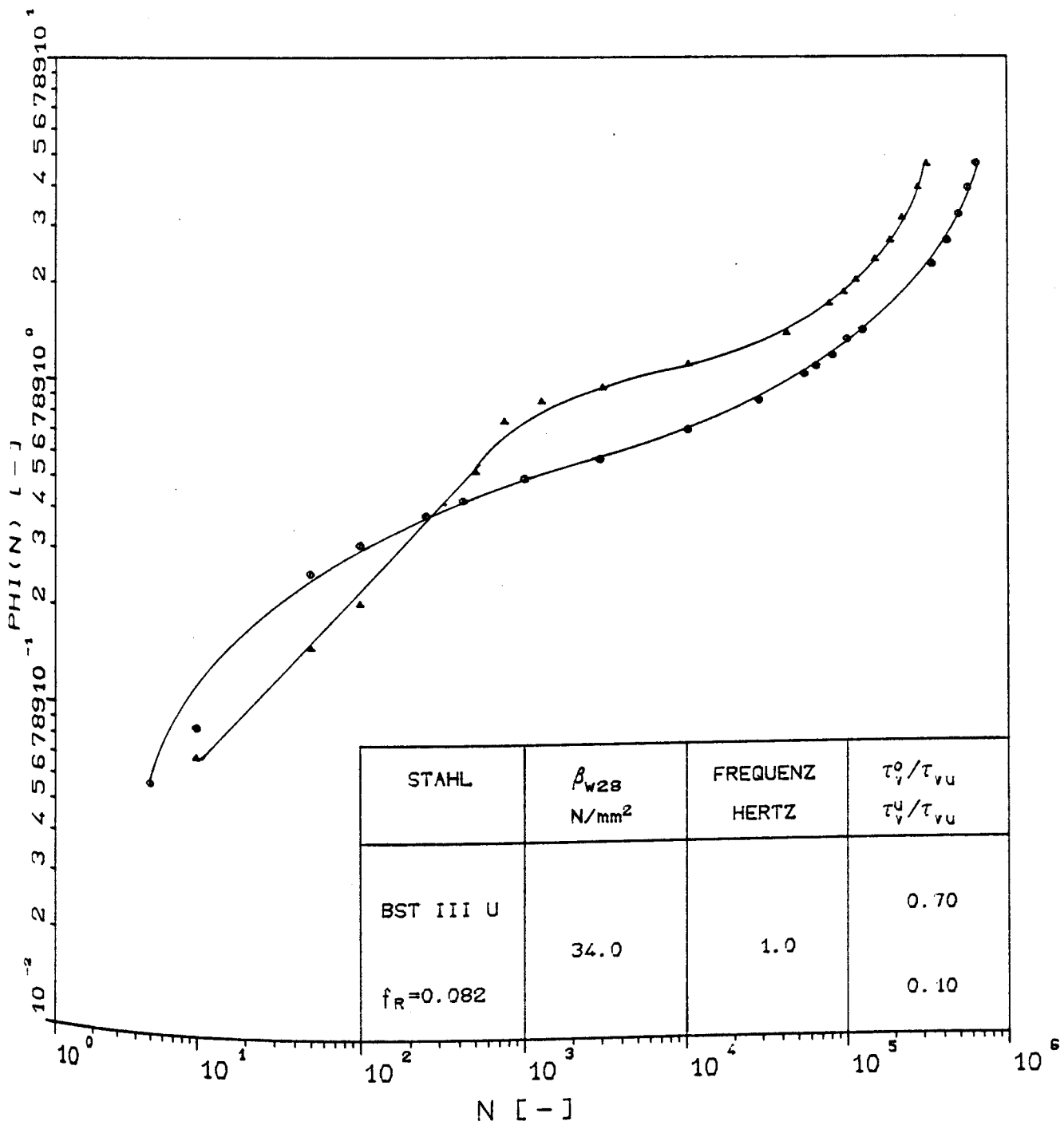
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche AKZ12.05, AKZ12.06, AKZ12.10 und AKZ12.16



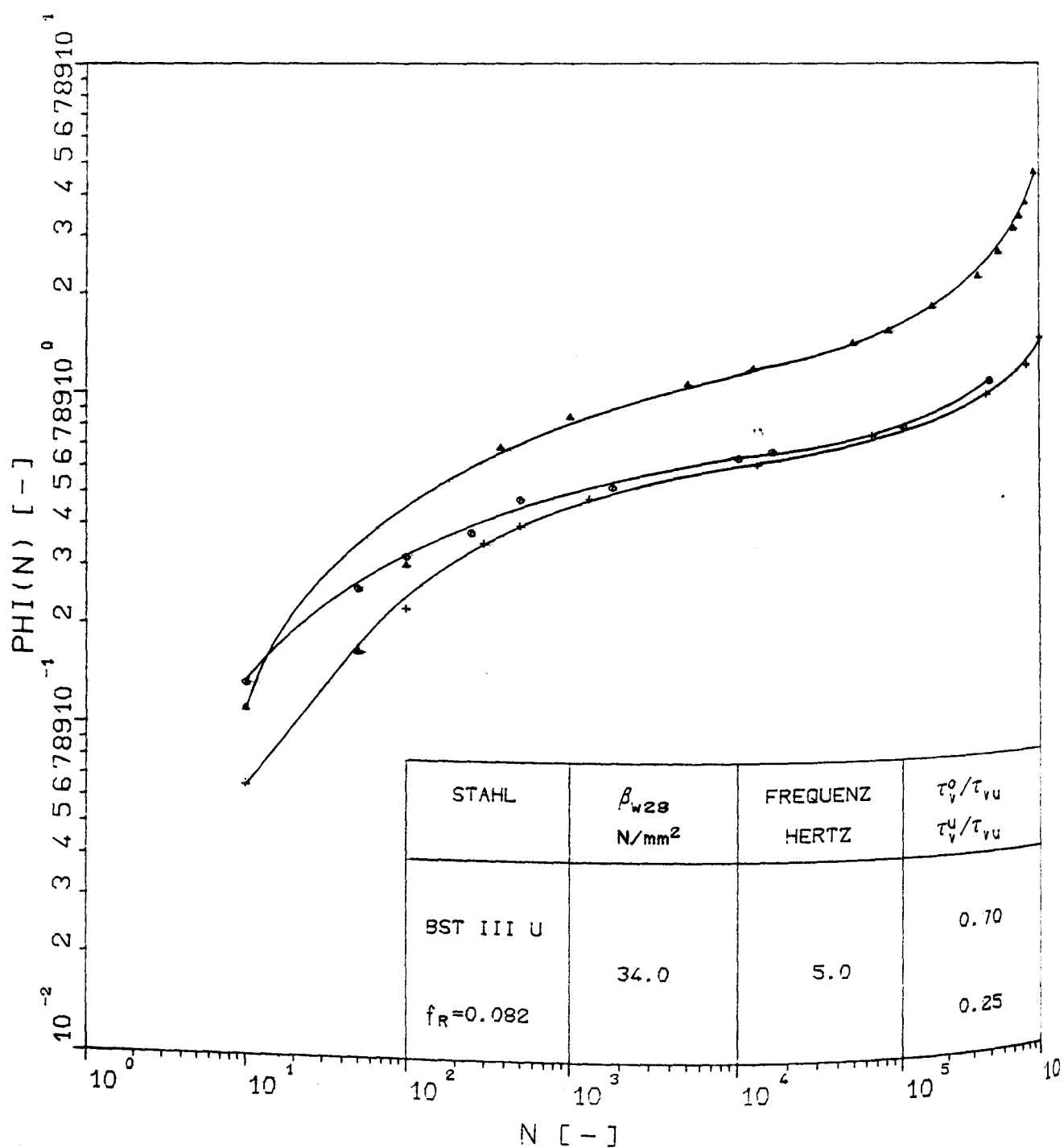
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche AKZ12.01 und AKZ12.20



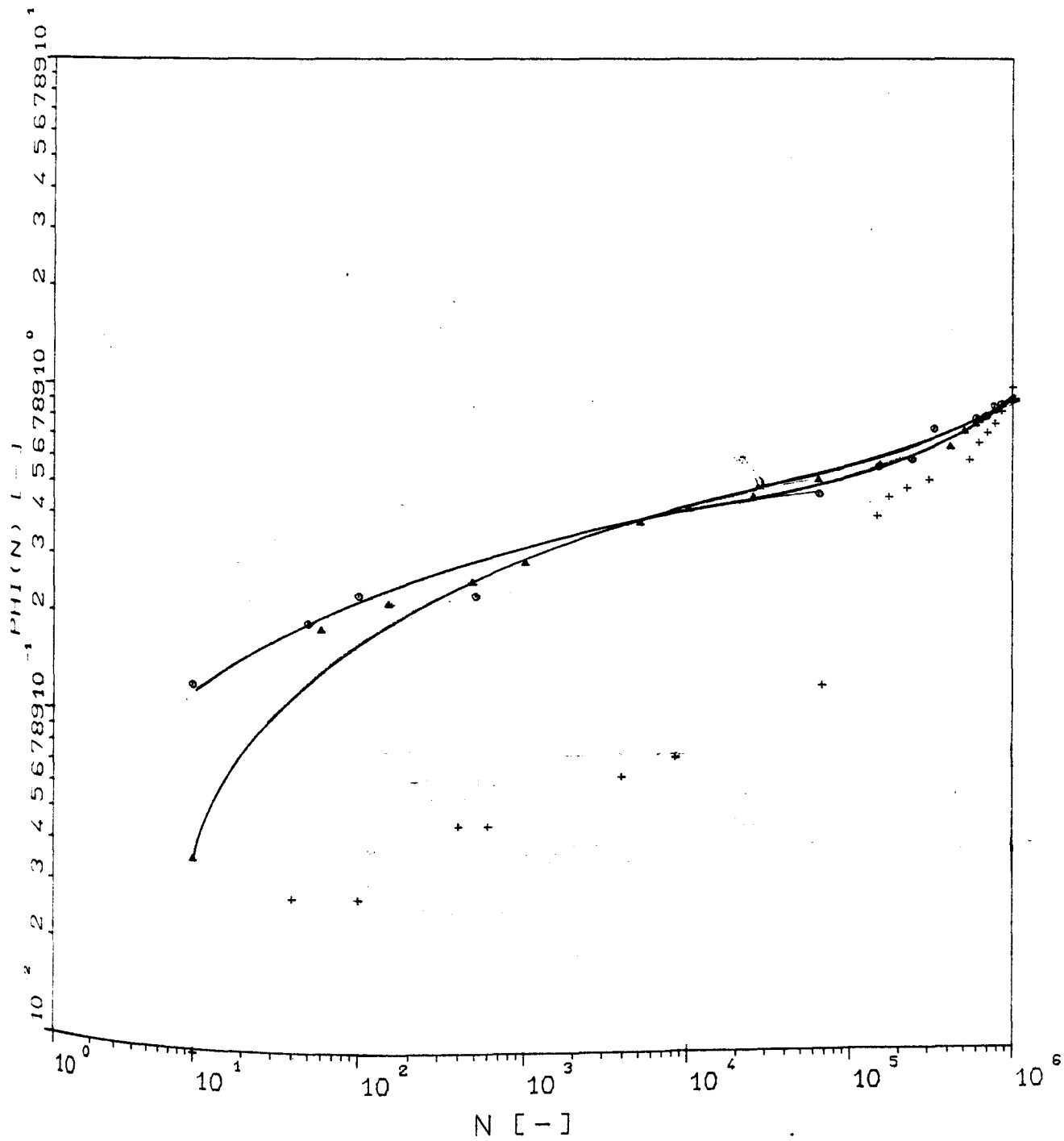
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche AKZ17.10 und AKZ17.18



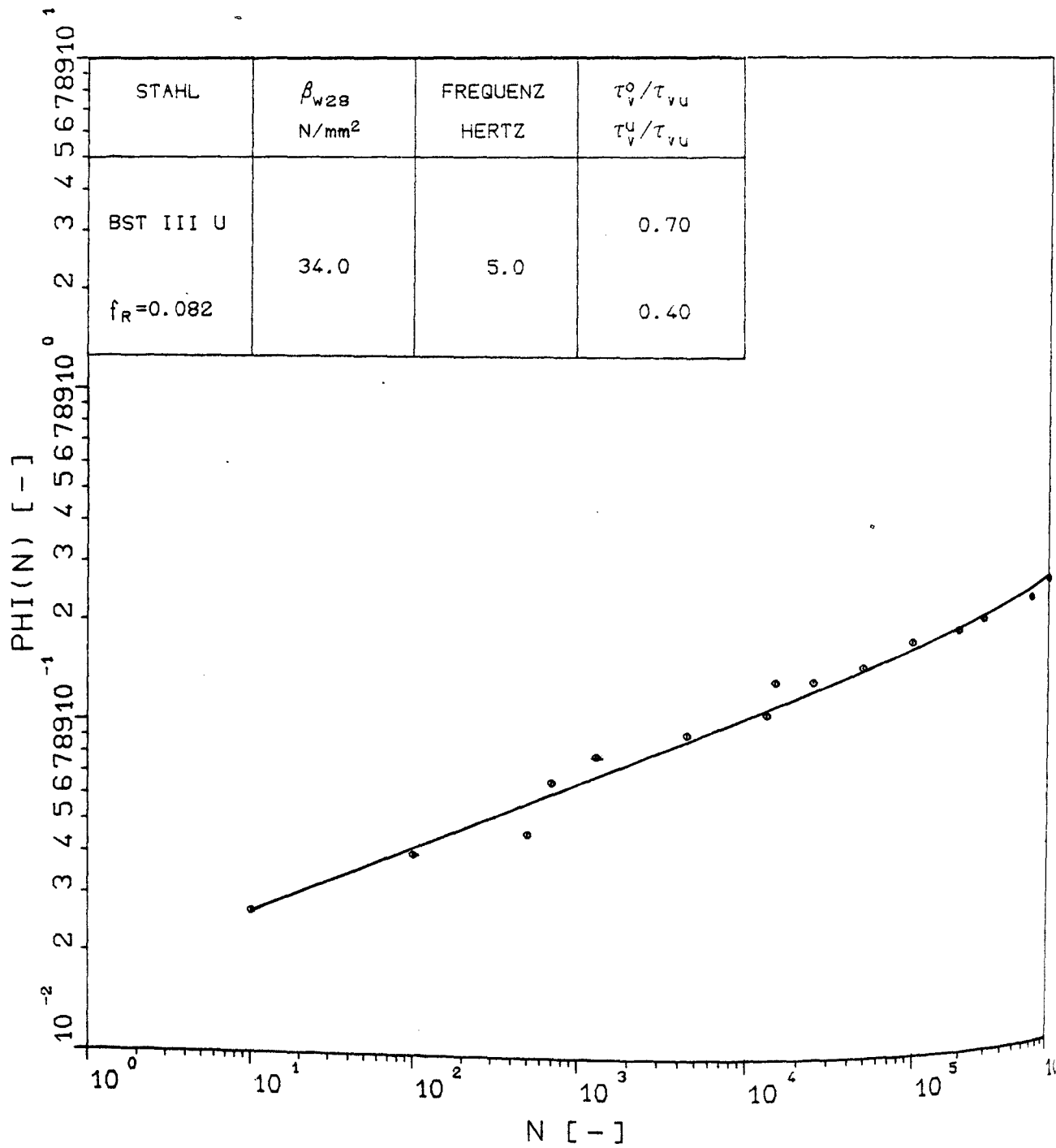
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche AKZ17.05 und AKZ17.06



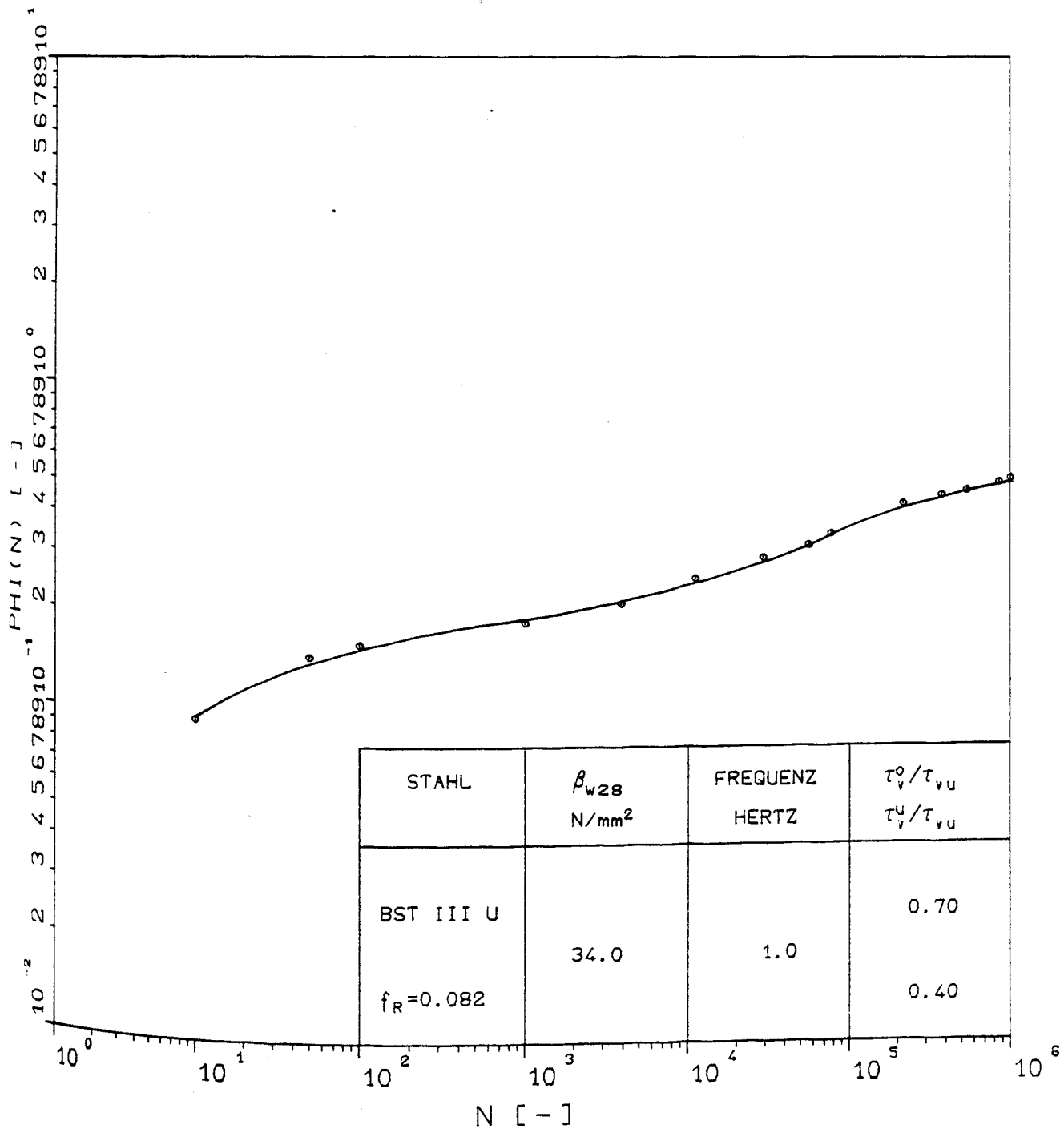
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche
AKZ17.04, AKZ17.07 und AKZ17.19



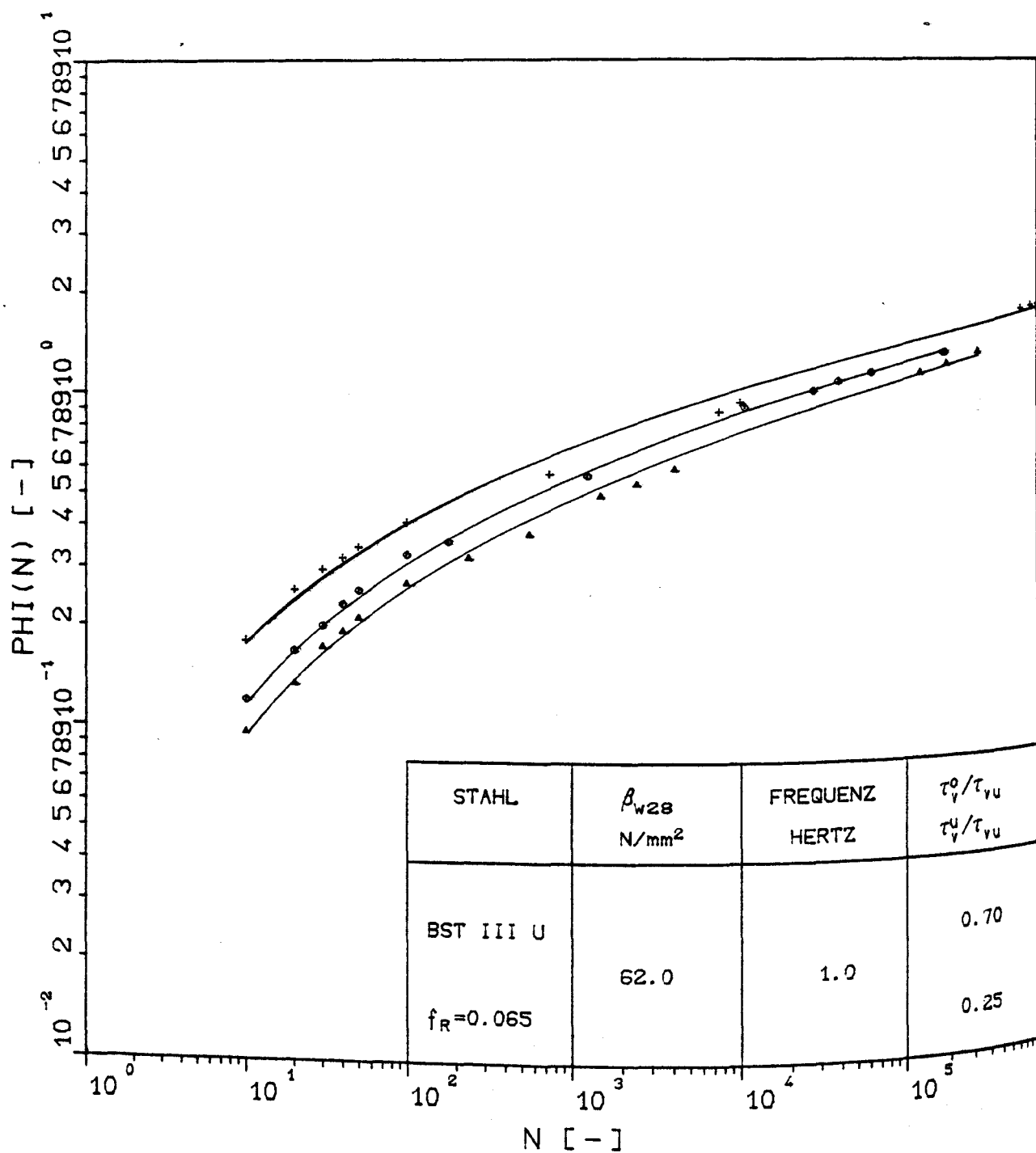
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche
AKZ17.02, AKZ17.12 und AKZ17.13



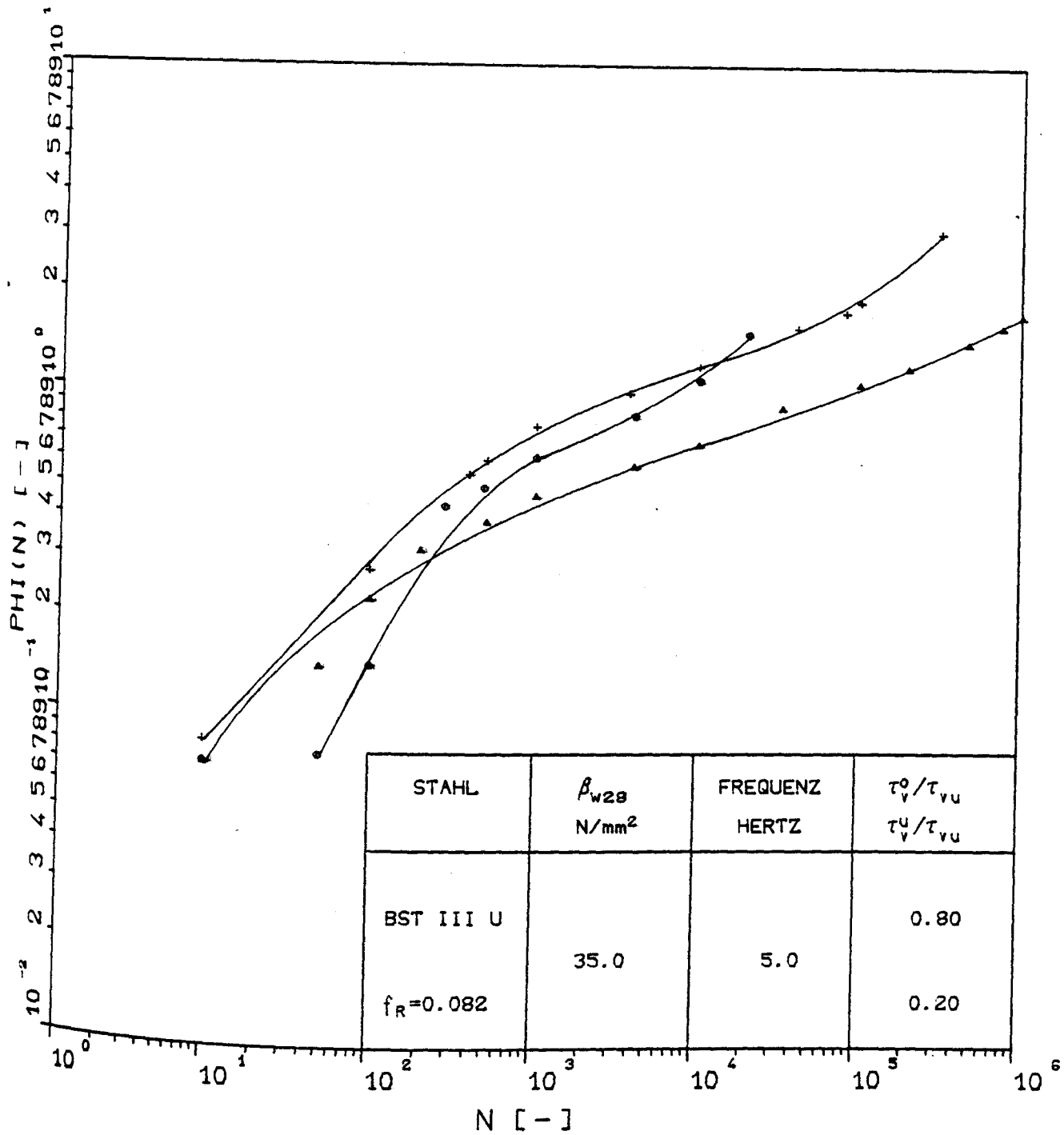
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für den Versuch AKZ17.01



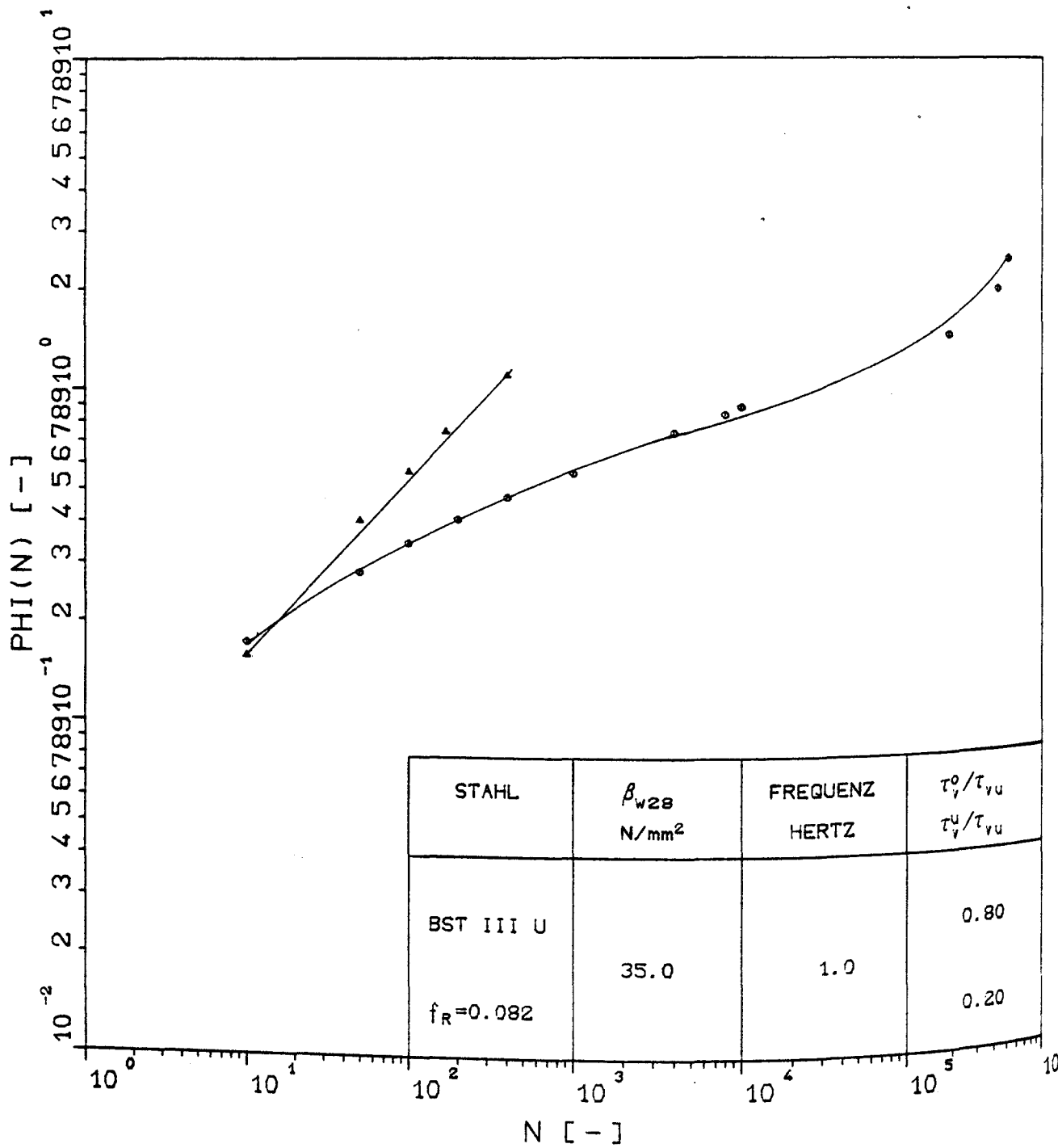
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für den Versuch
AKZ17.08



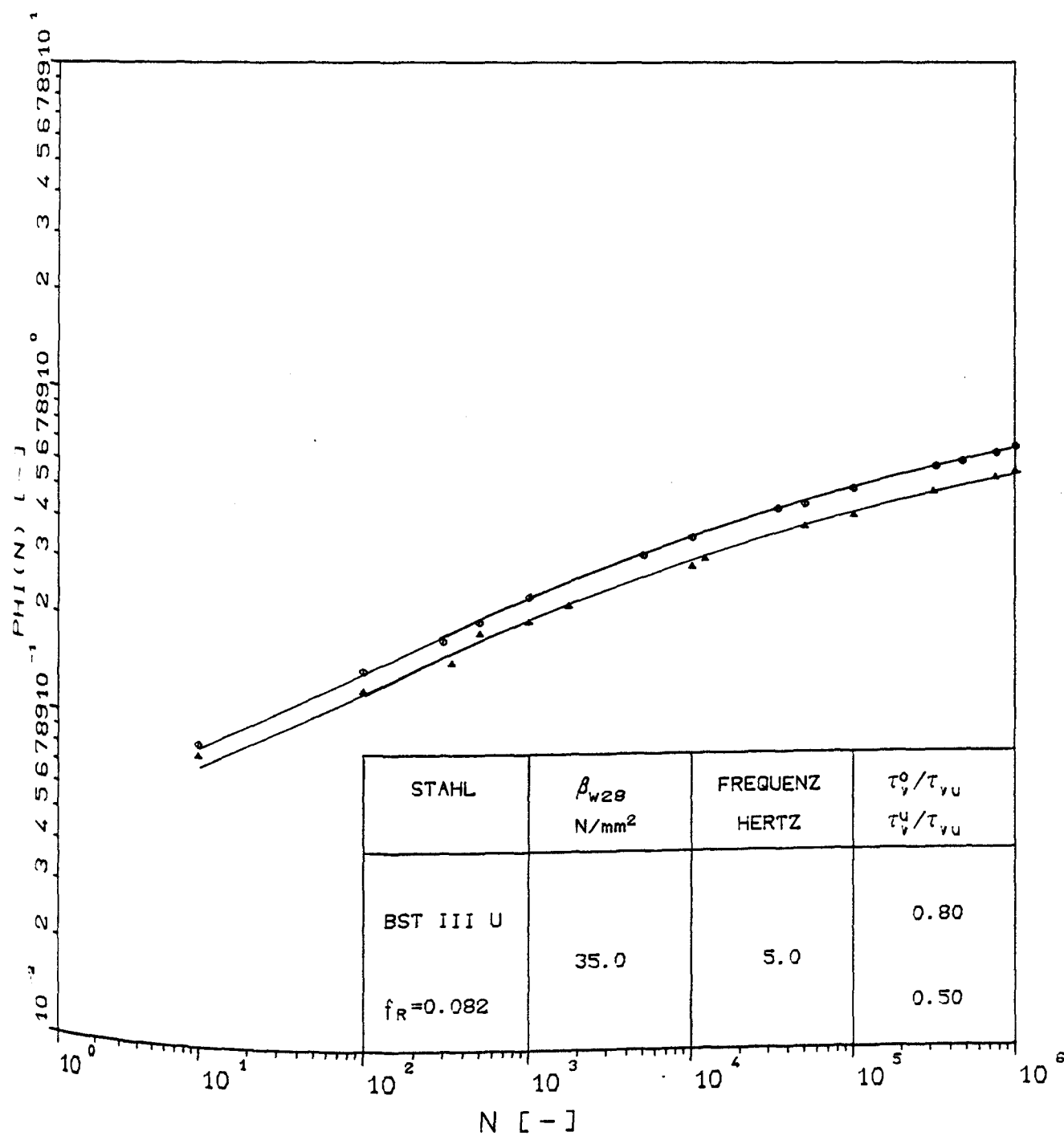
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche
AKZ19.03, AKZ19.08 und AKZ19.16



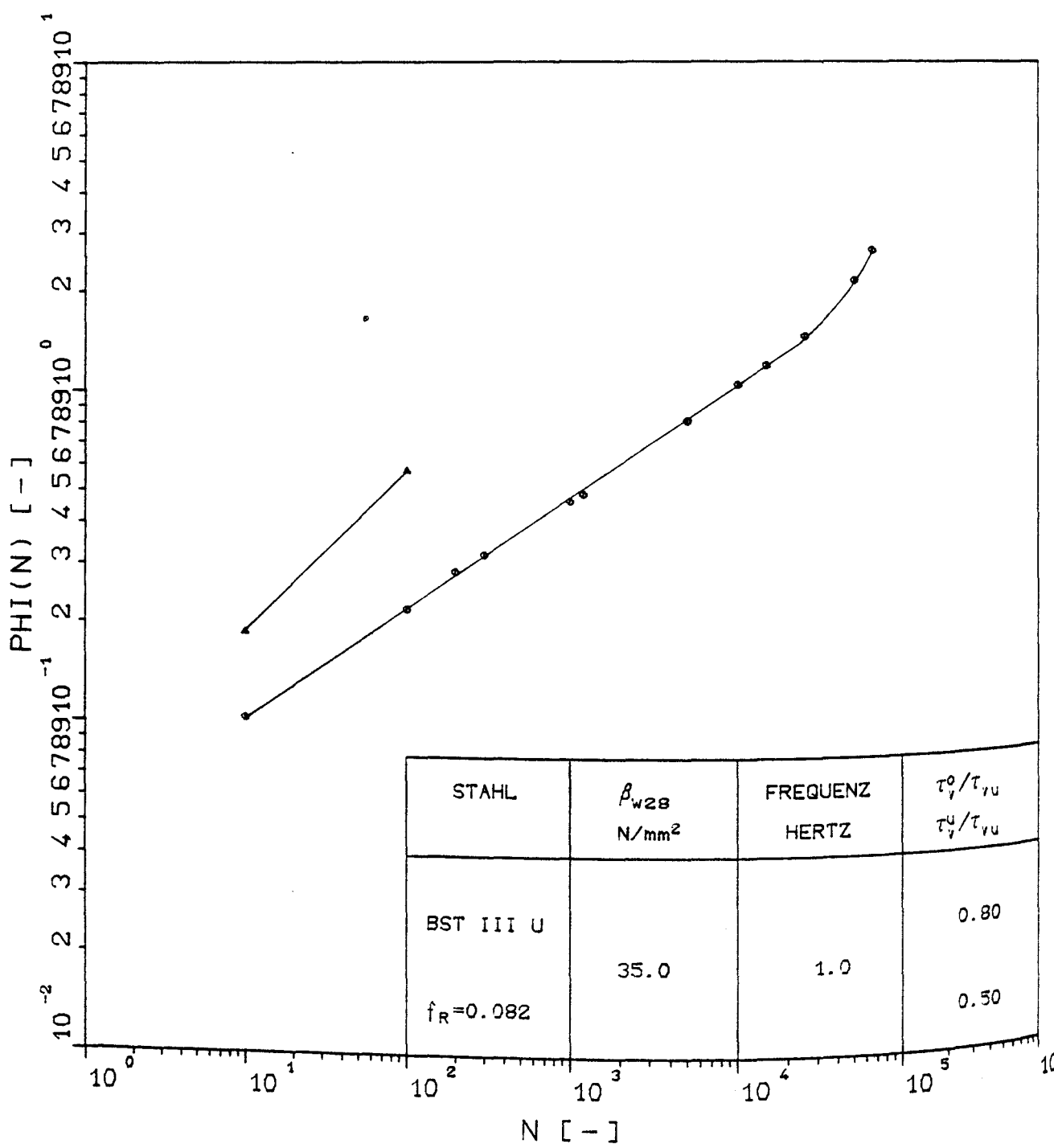
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche AKZ20.02, AKZ20.13 und AKZ20.18



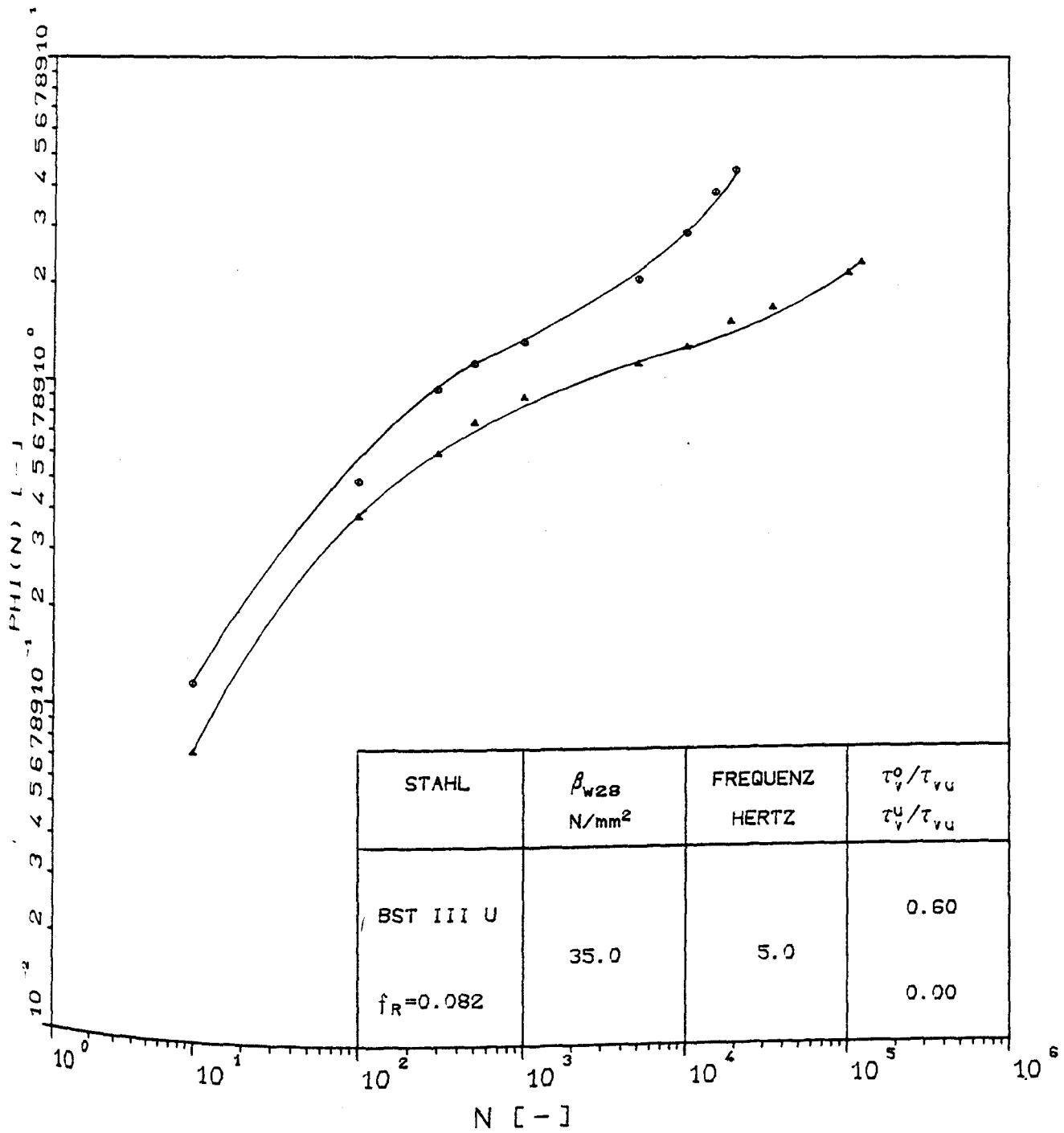
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche AKZ20.14 und AKZ20.19



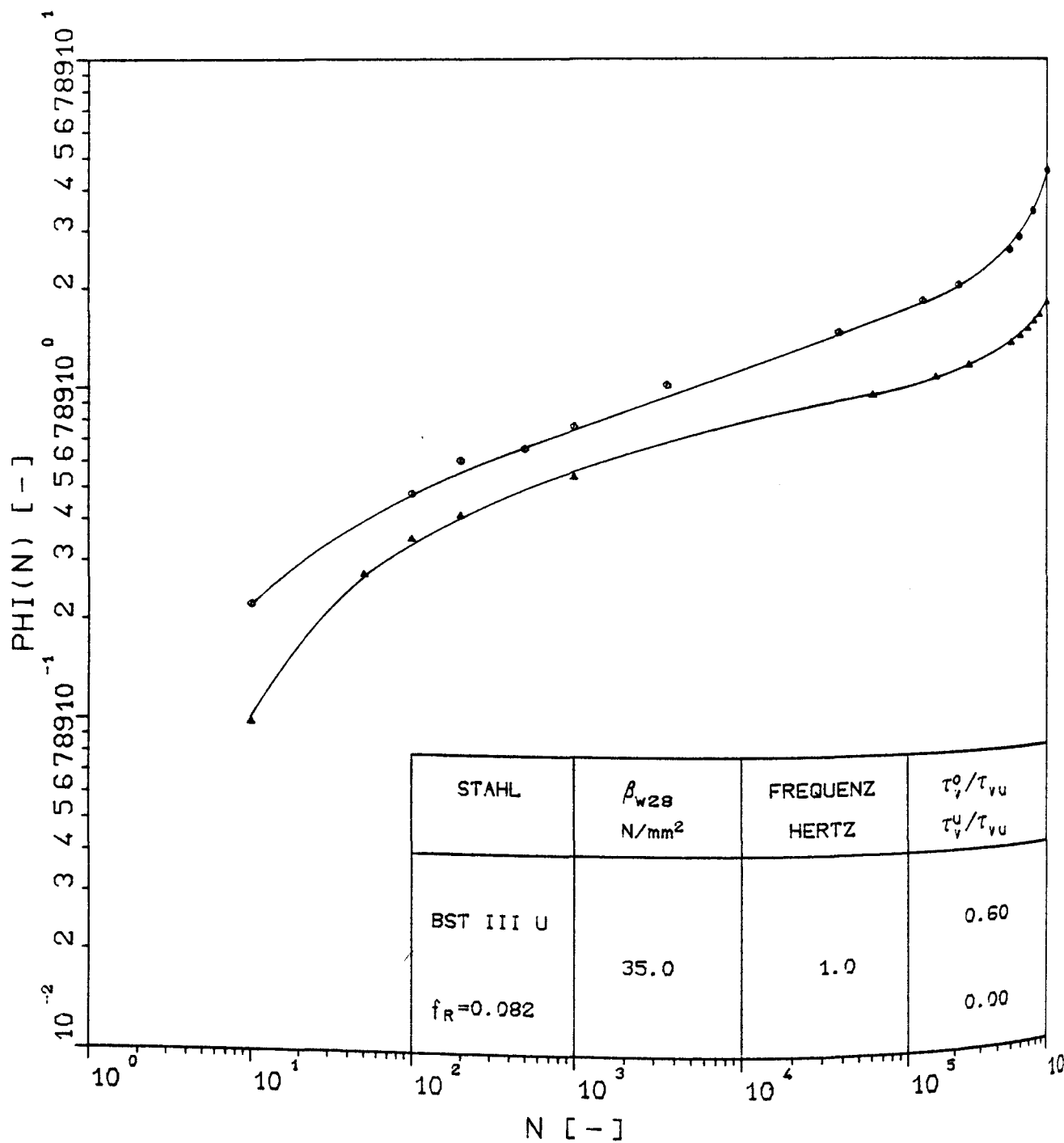
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche AKZ20.07 und AKZ20.08



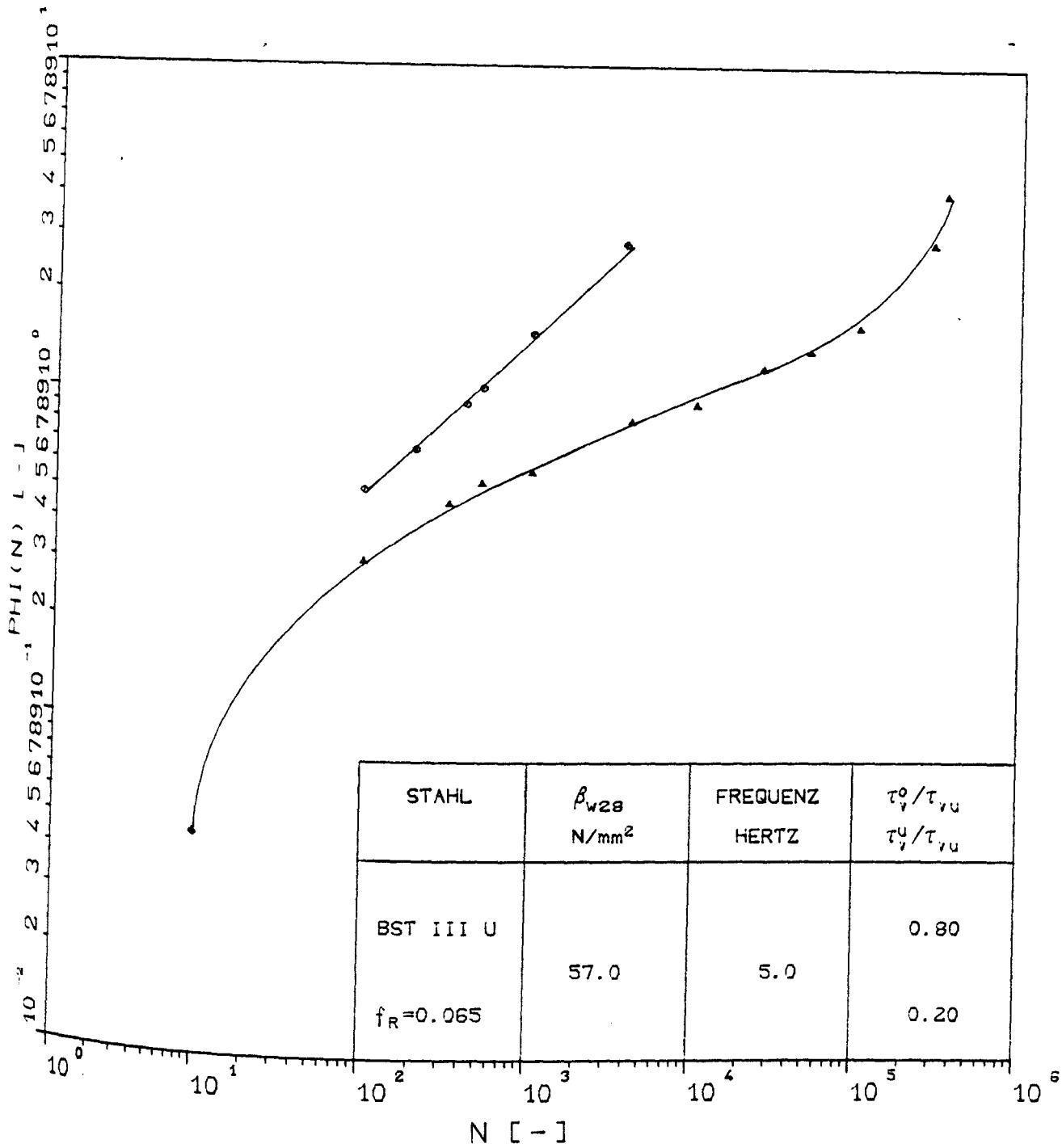
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche AKZ20.04 und AKZ20.16



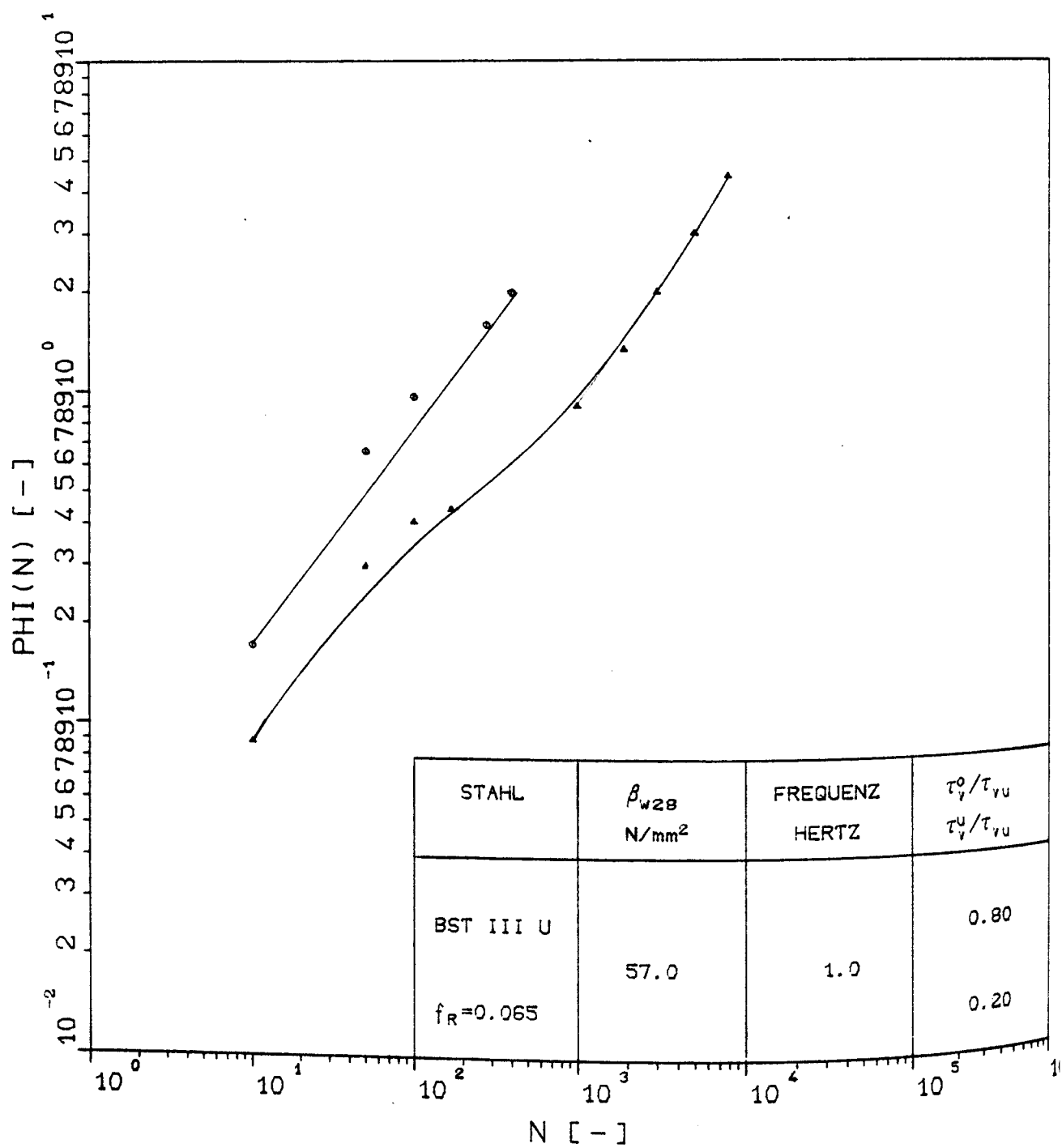
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche AKZ20.15 und AKZ20.17



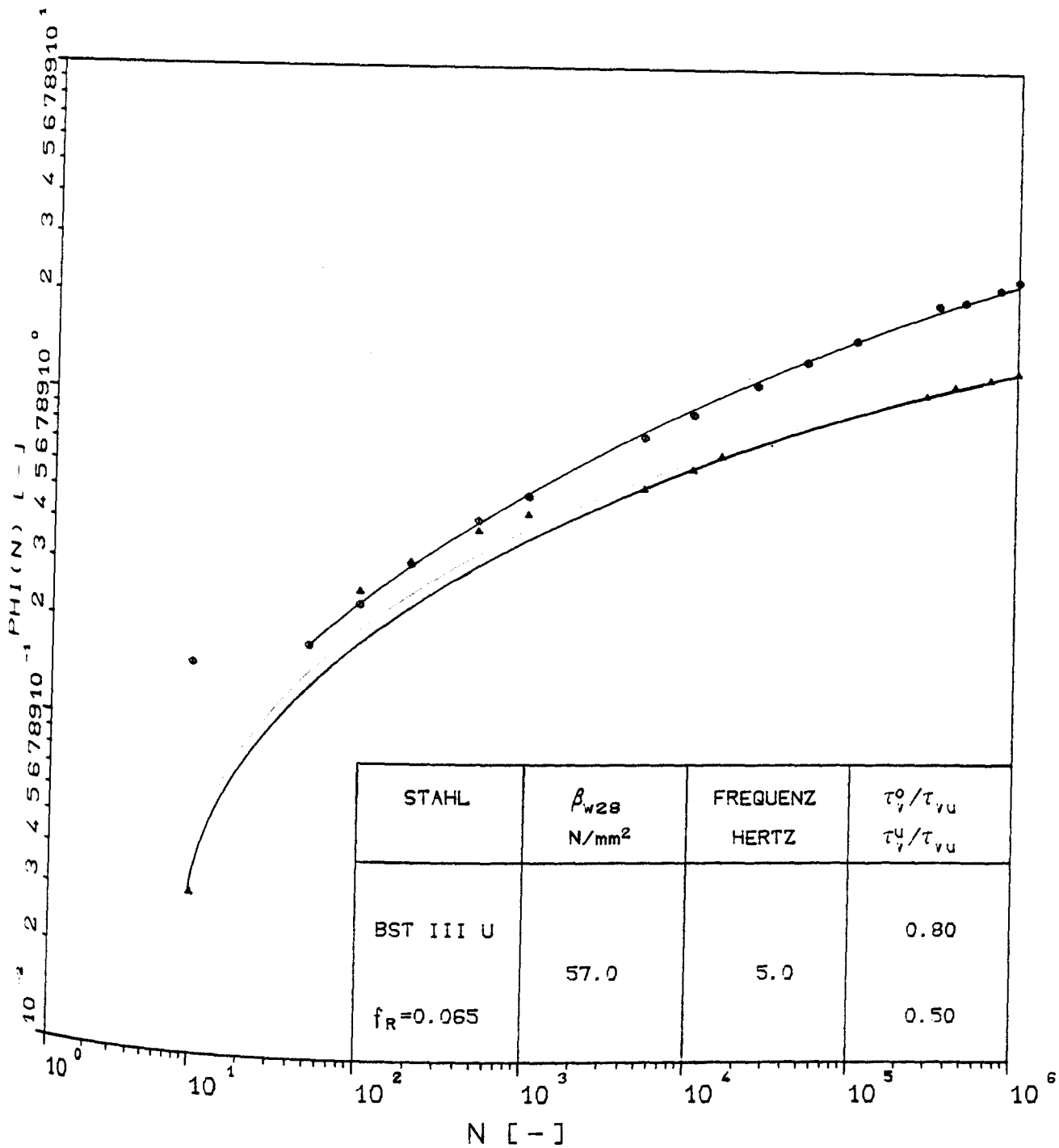
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche
AKZ20.09 und AKZ20.12



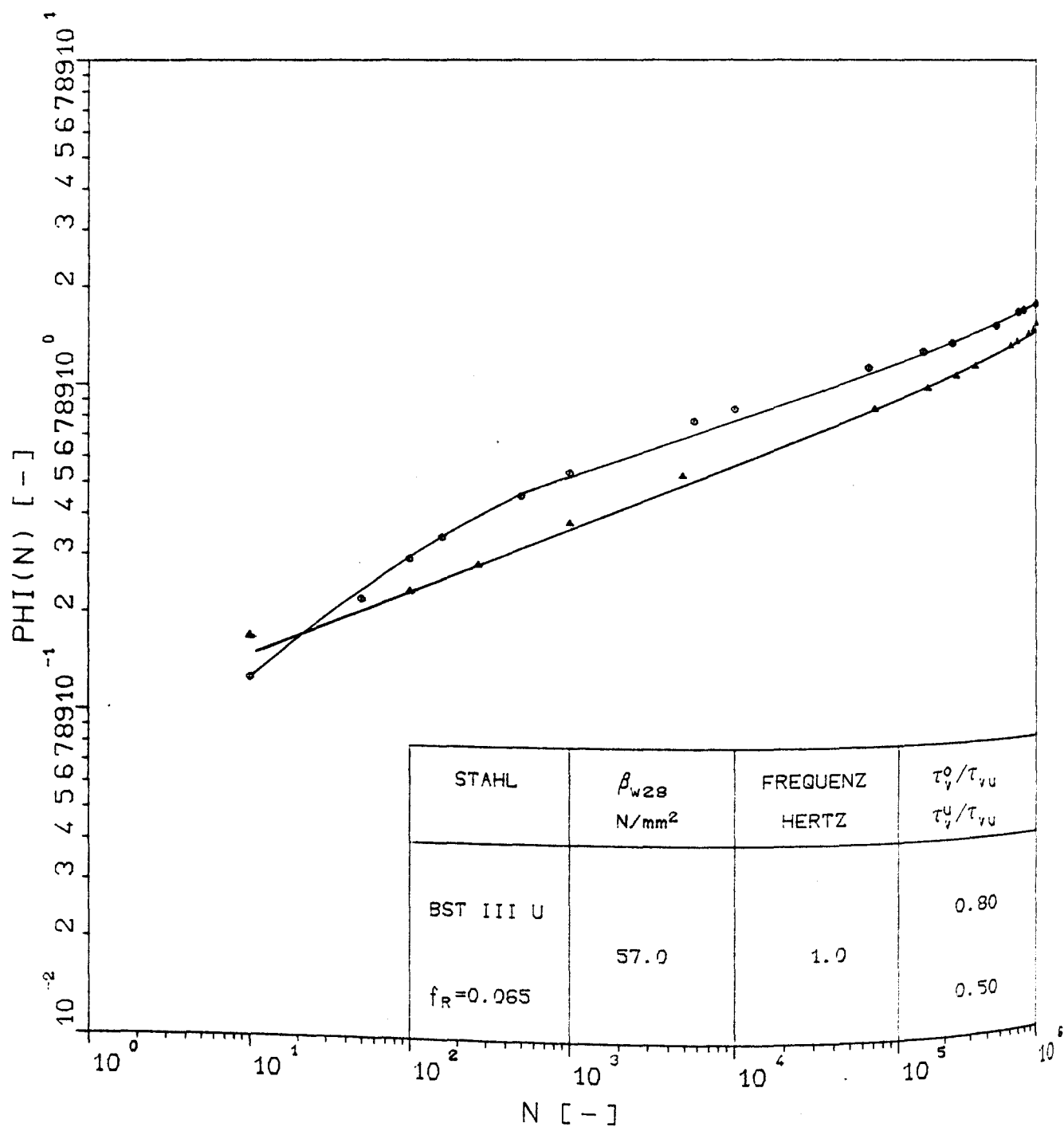
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche AKZ21.02 und AKZ21.11



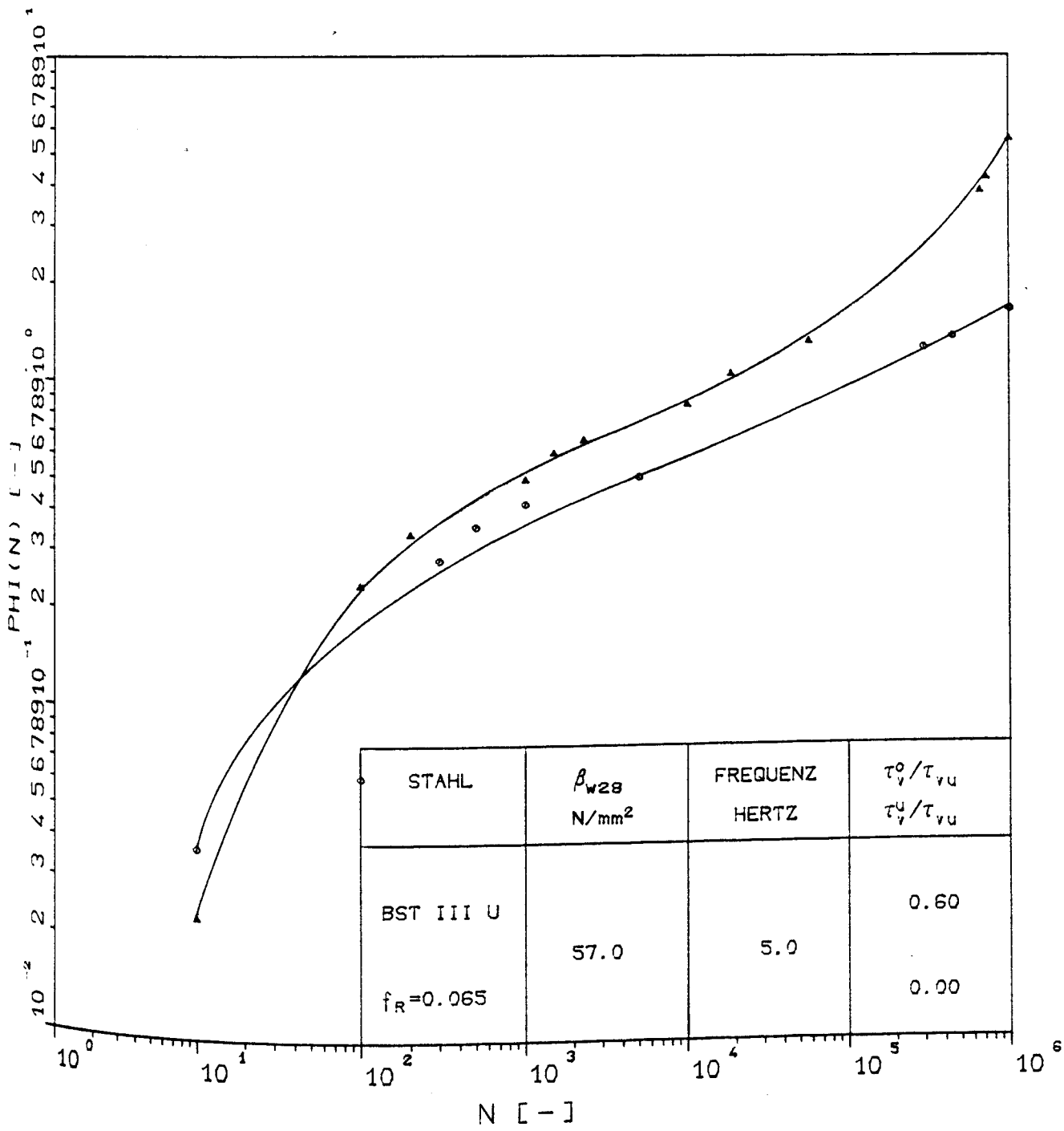
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche
AKZ21.10 und AKZ21.16



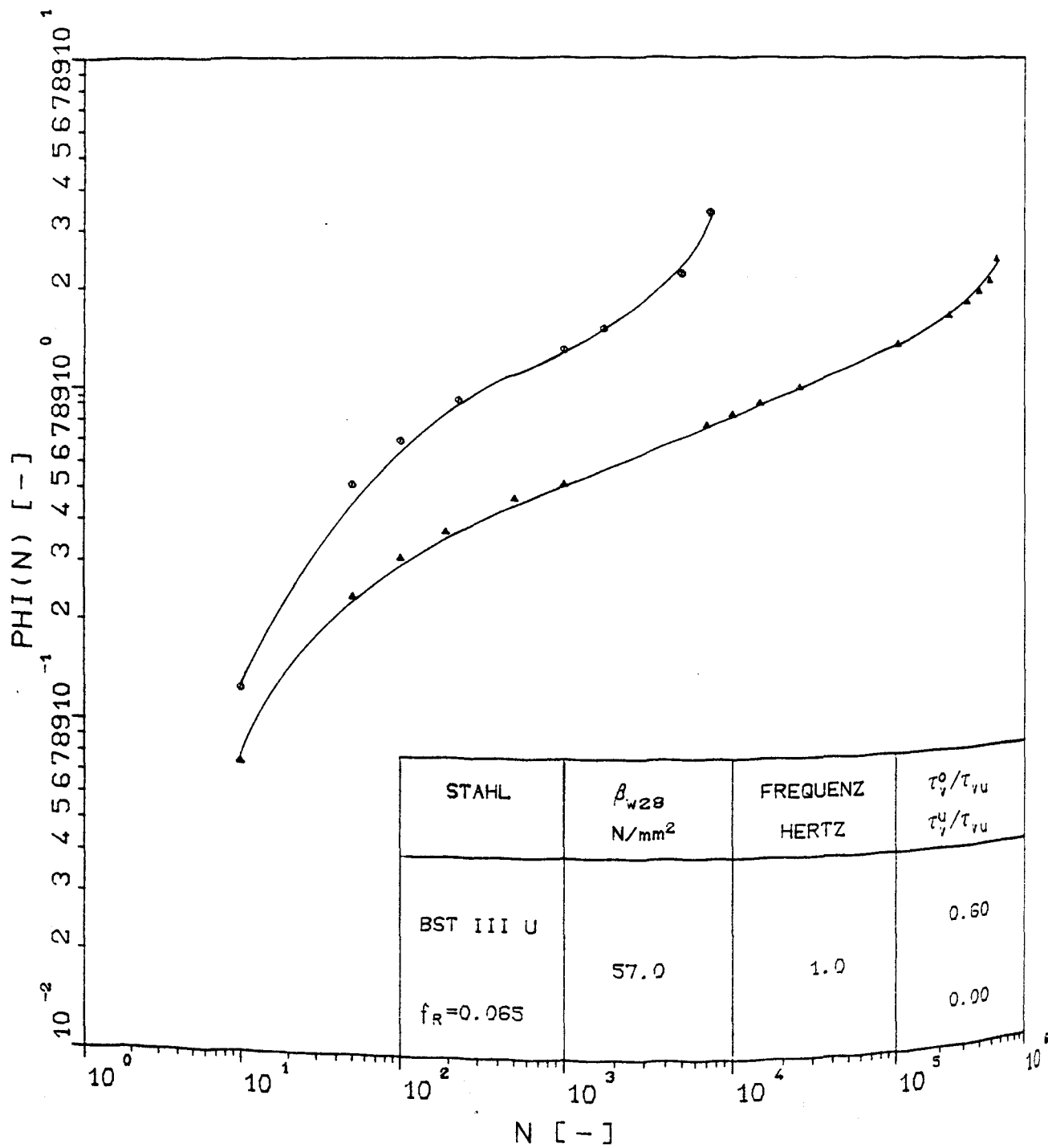
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche AKZ21.18 und AKZ21.20



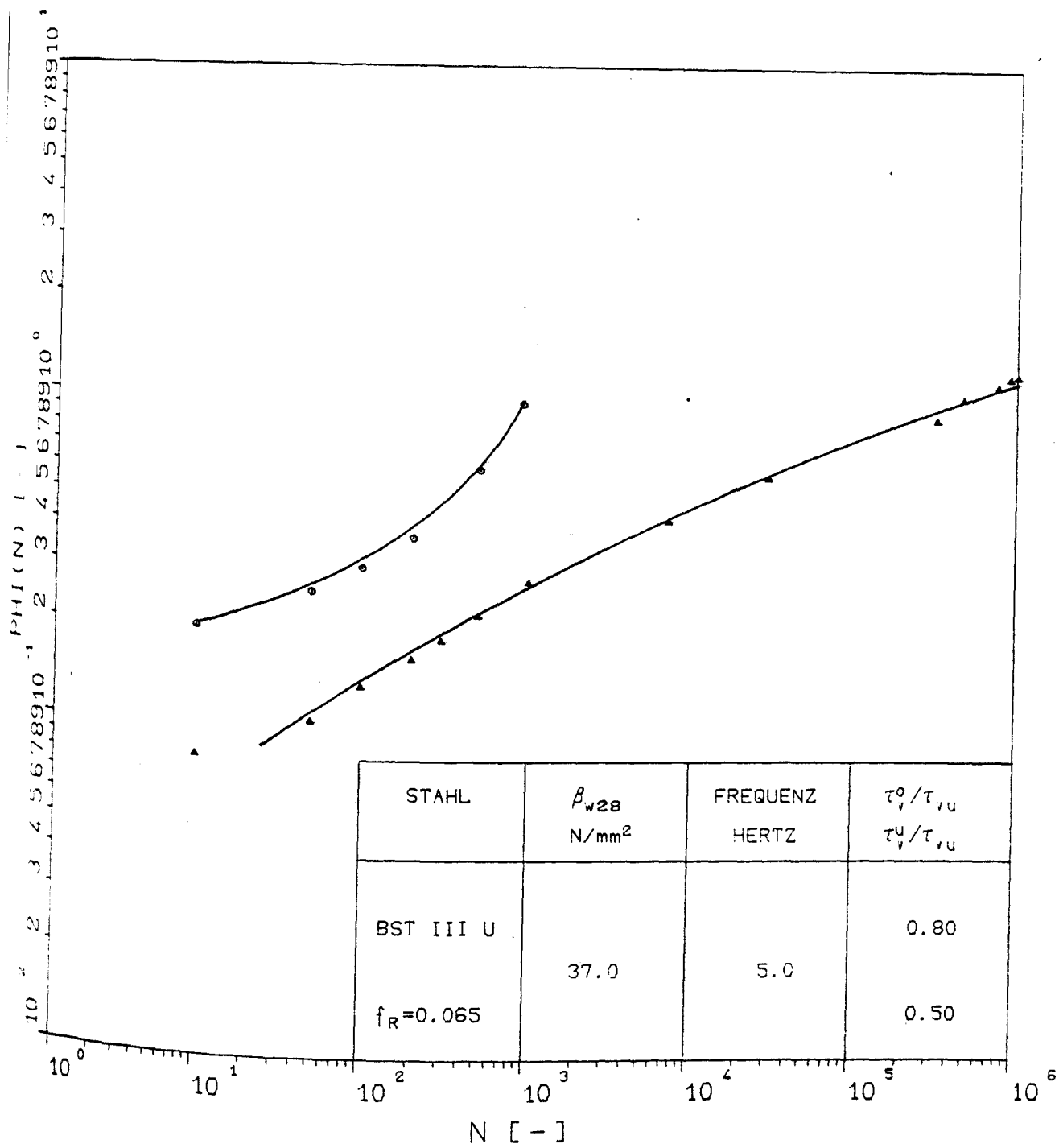
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche AKZ21.06 und AKZ21.12



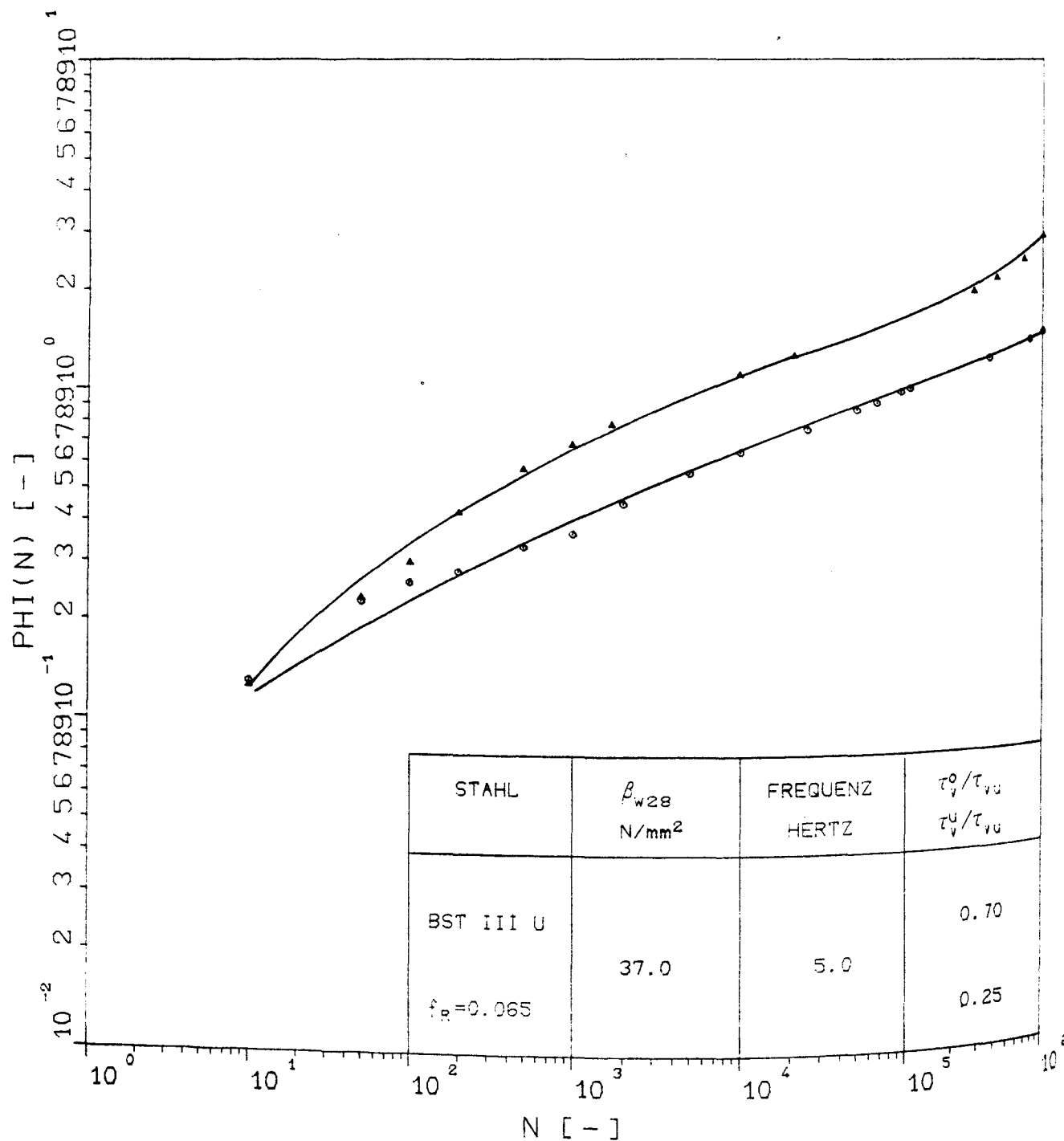
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche AKZ21.07 und AKZ21.19



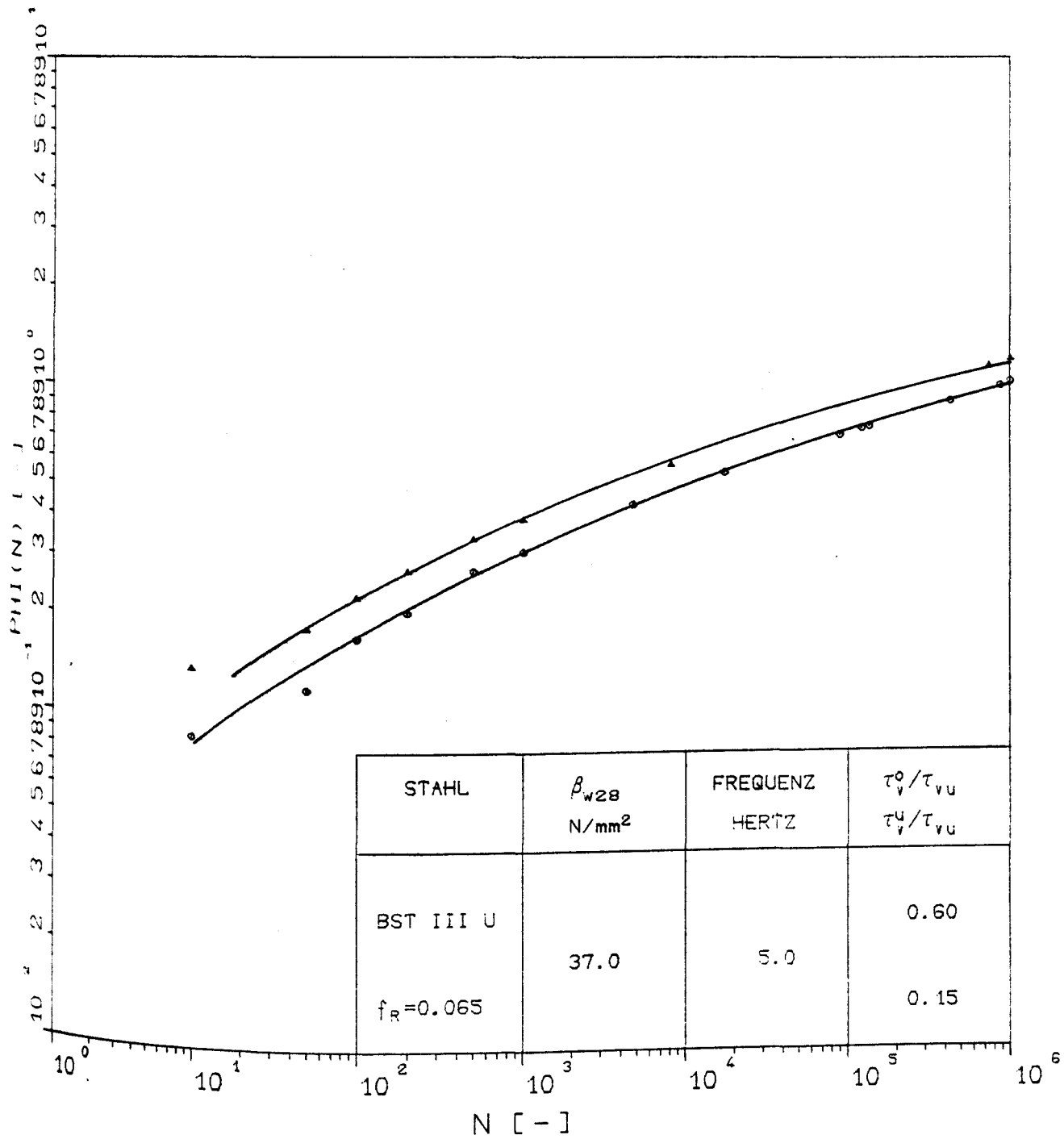
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche AKZ21.04 und AKZ21.08



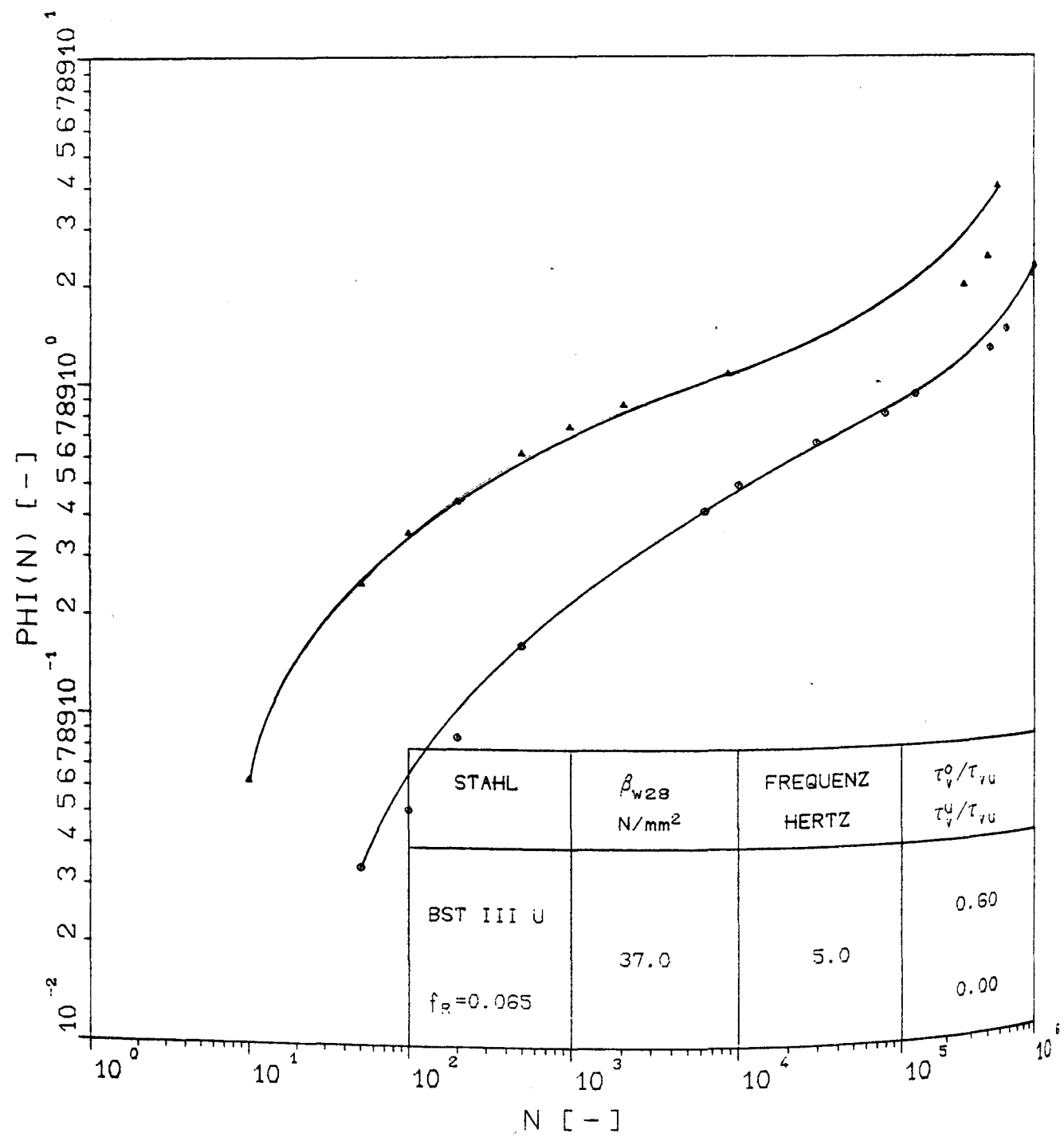
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche AKZ24.04 und AKZ24.05



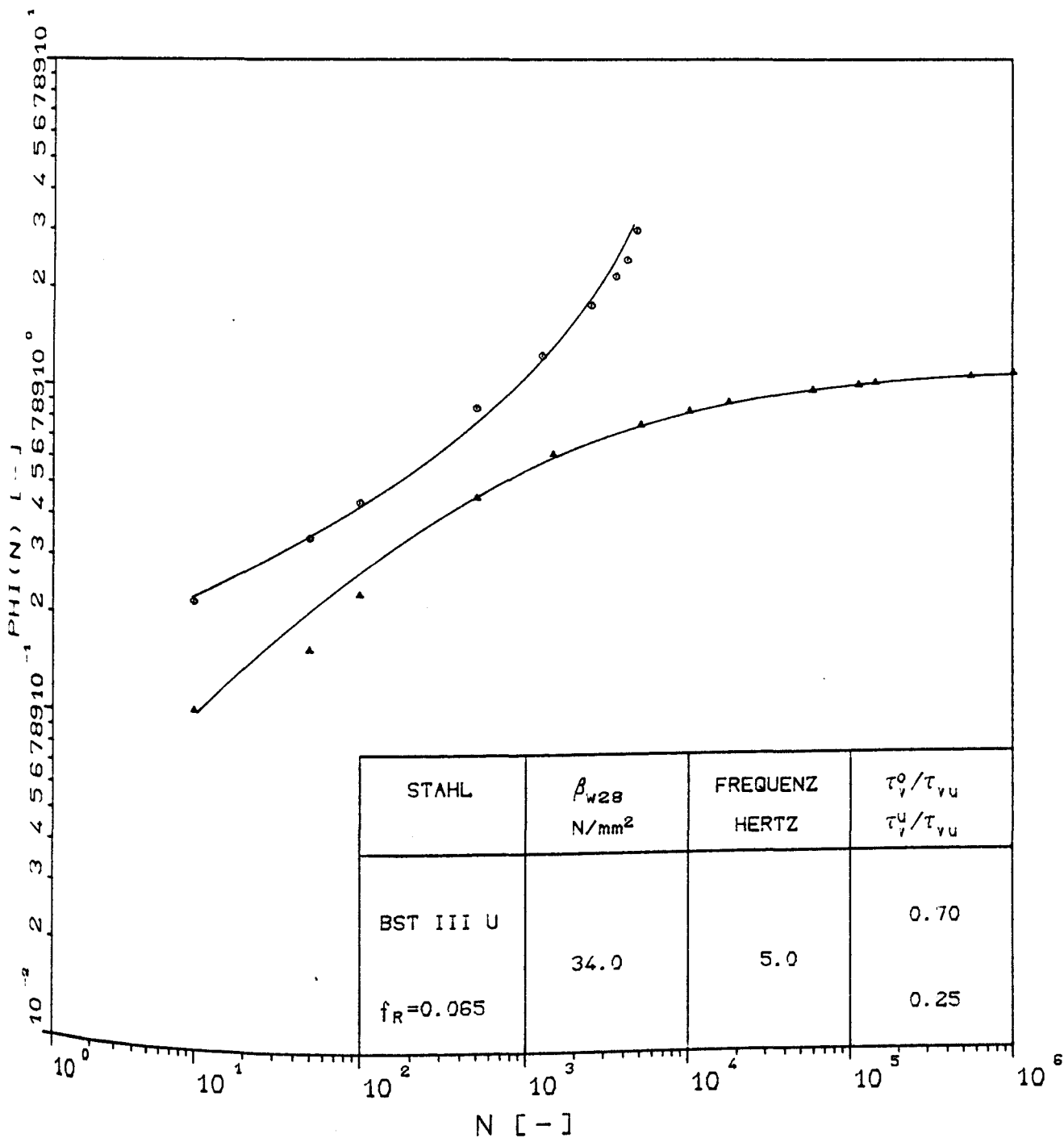
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche
AKZ24.18 und AKZ24.19



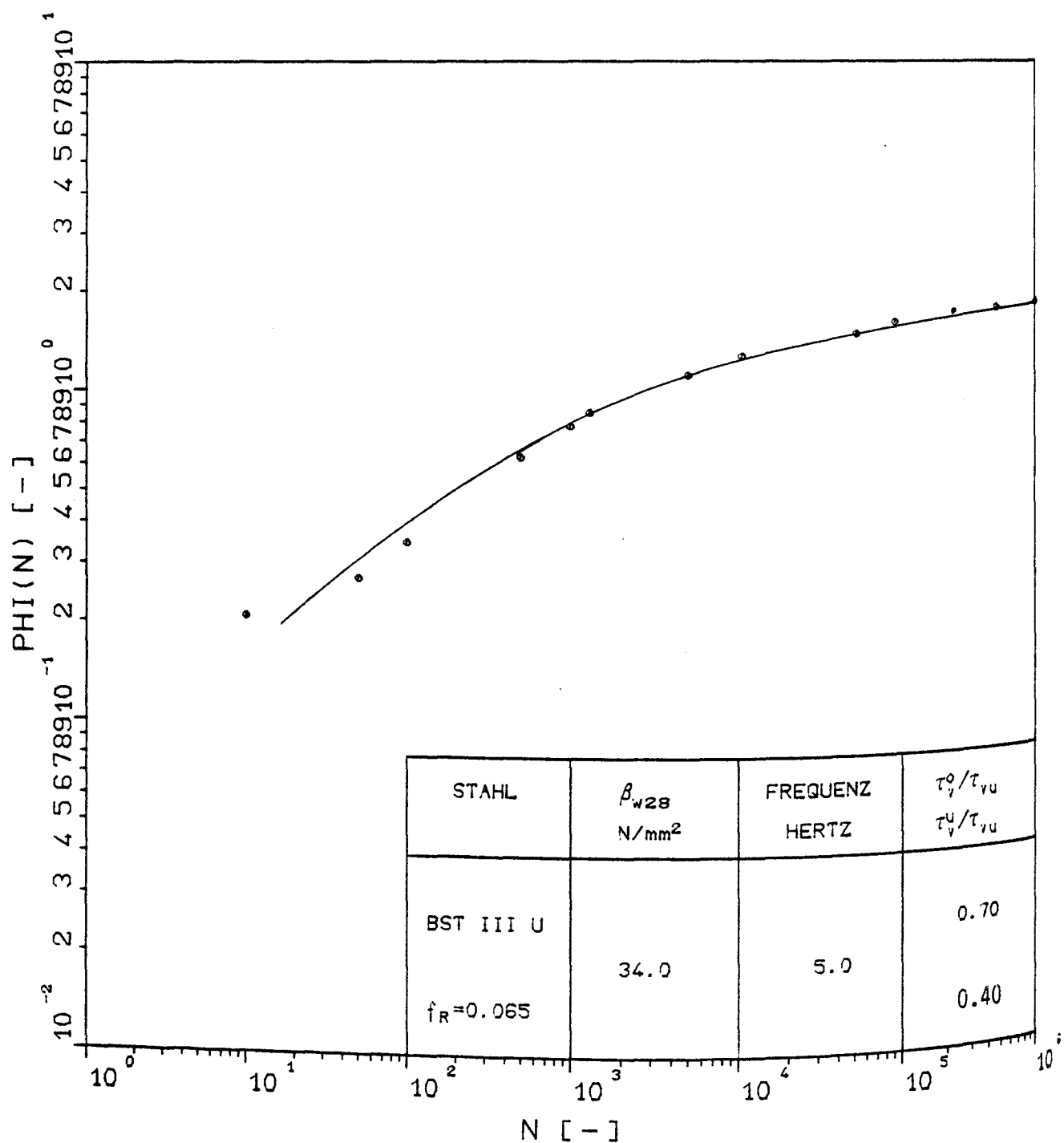
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche
AKZ24.12 und AKZ24.15



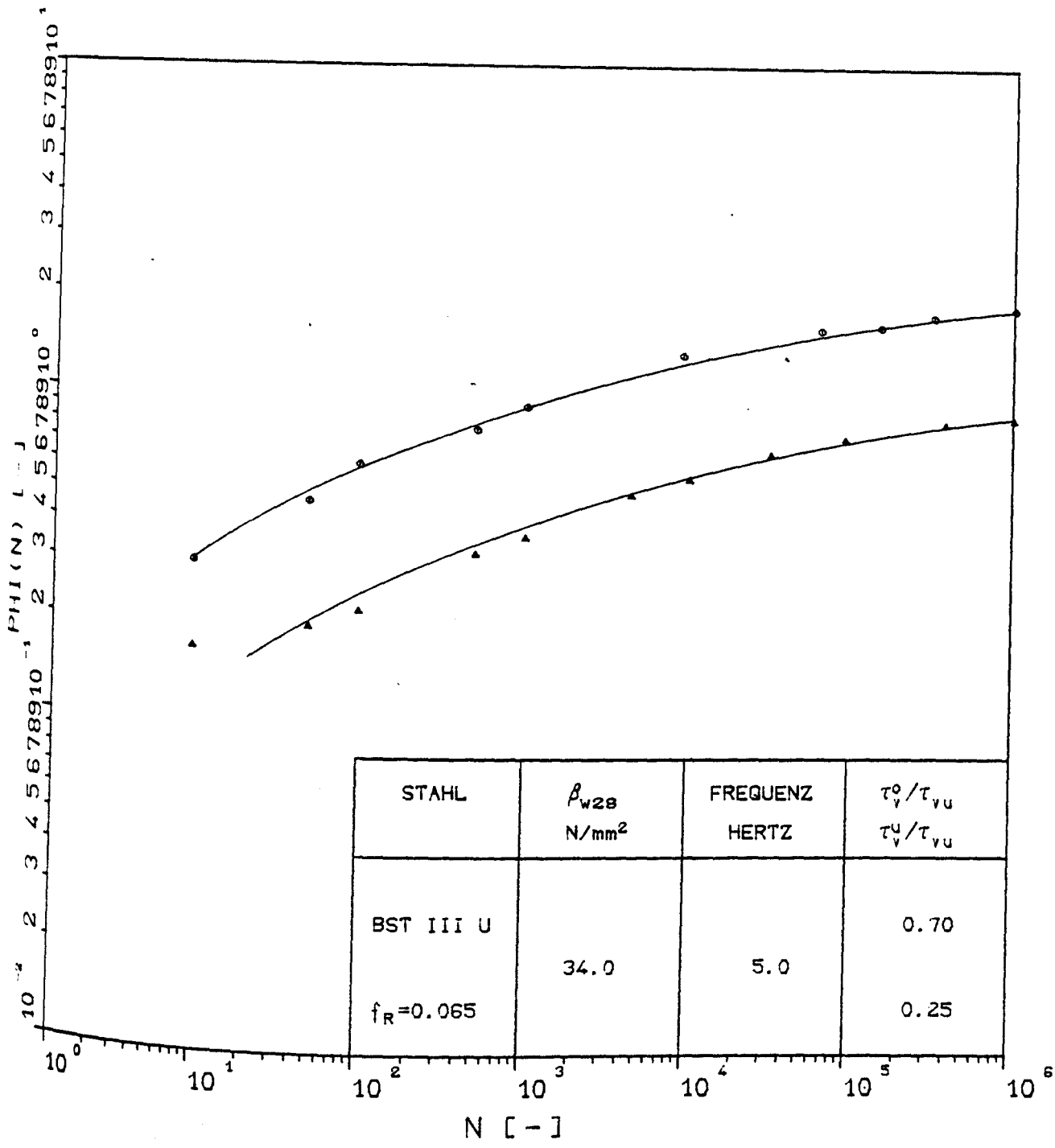
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche AKZ24.06 und AKZ24.11



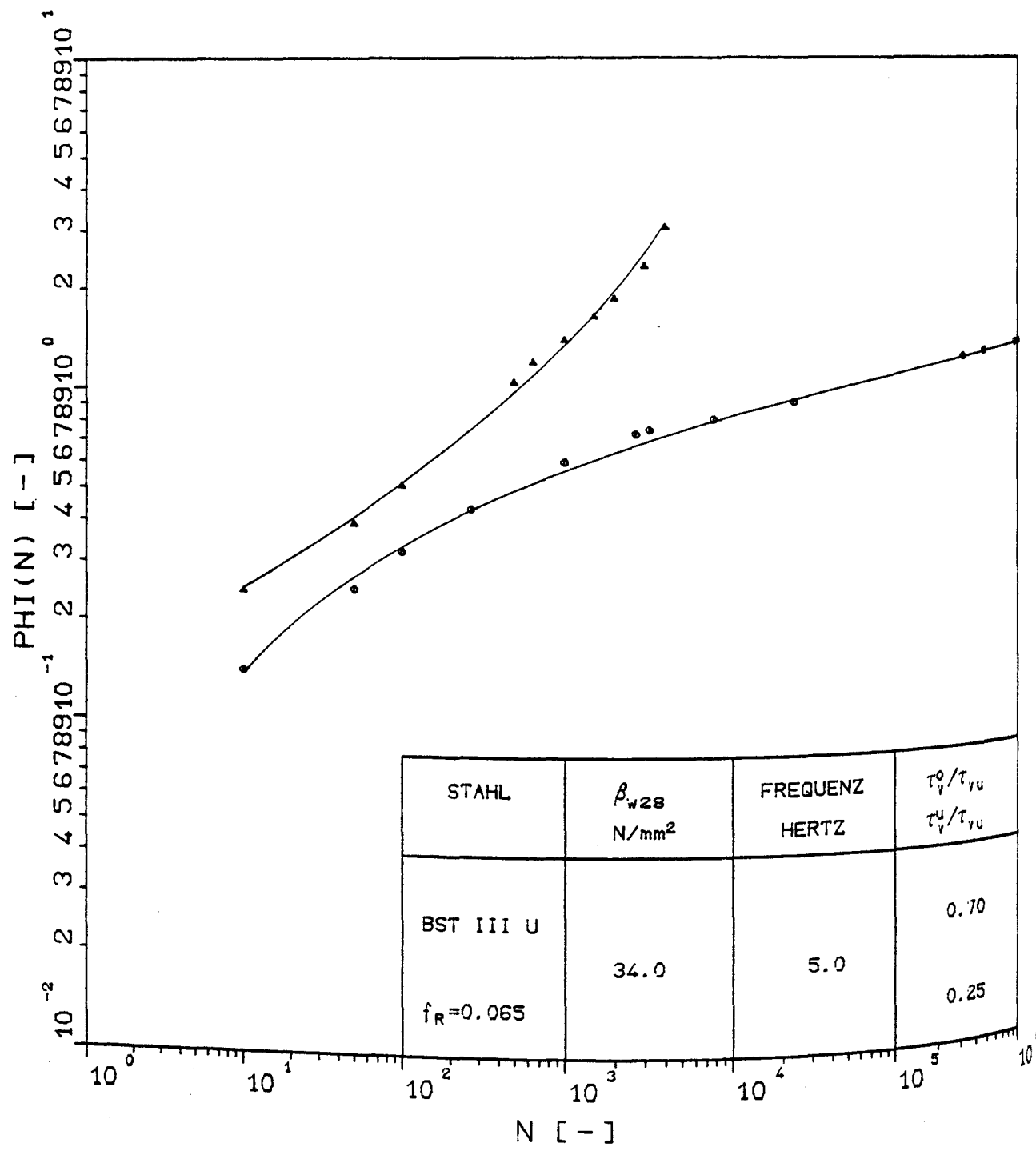
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche AKZ25.05 und AKZ25.06, Belastungsalter $T_0 = 7$ Tage



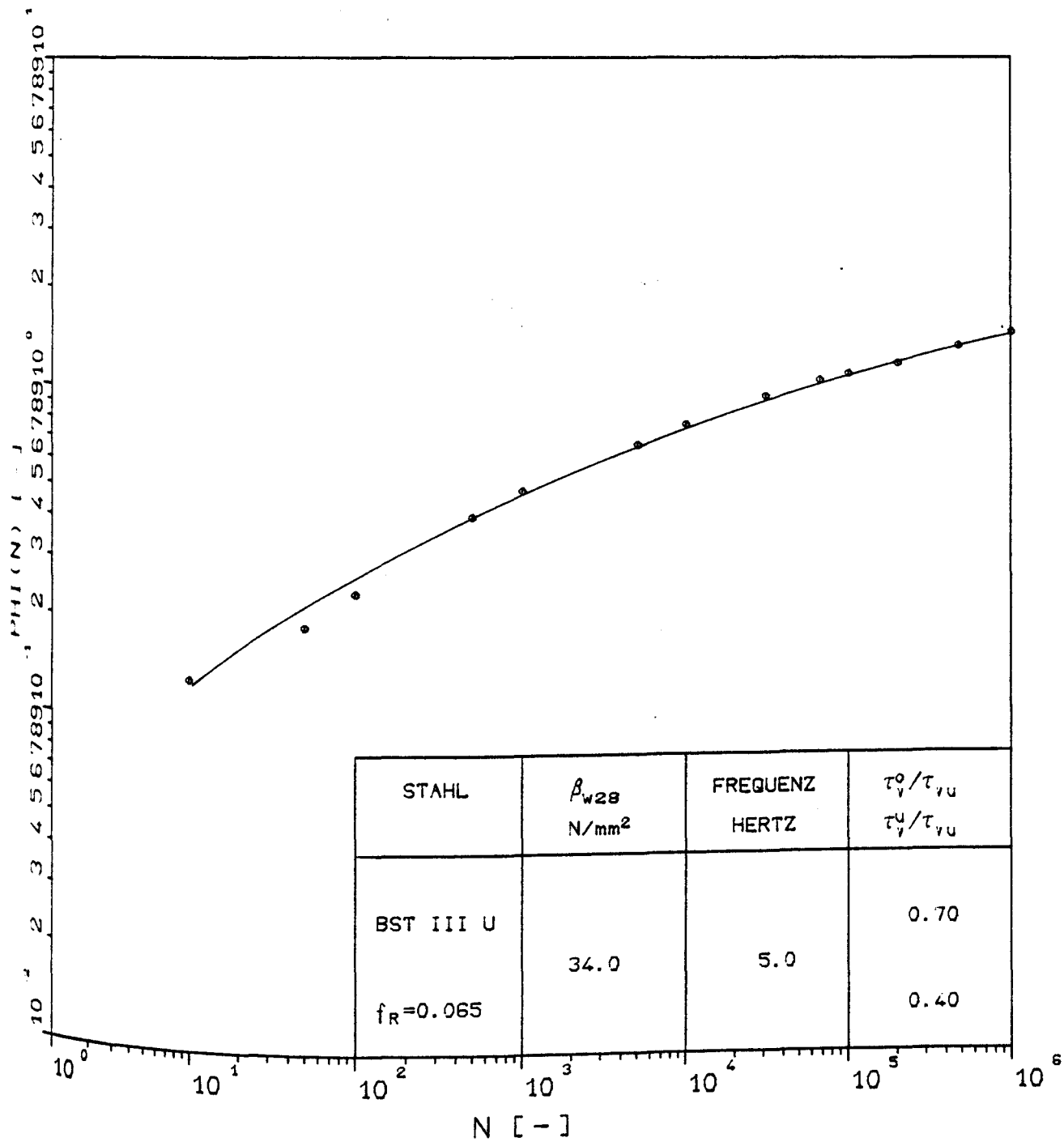
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für den Versuch
AKZ25.08, Belastungsalter $T_0 = 7$ Tage



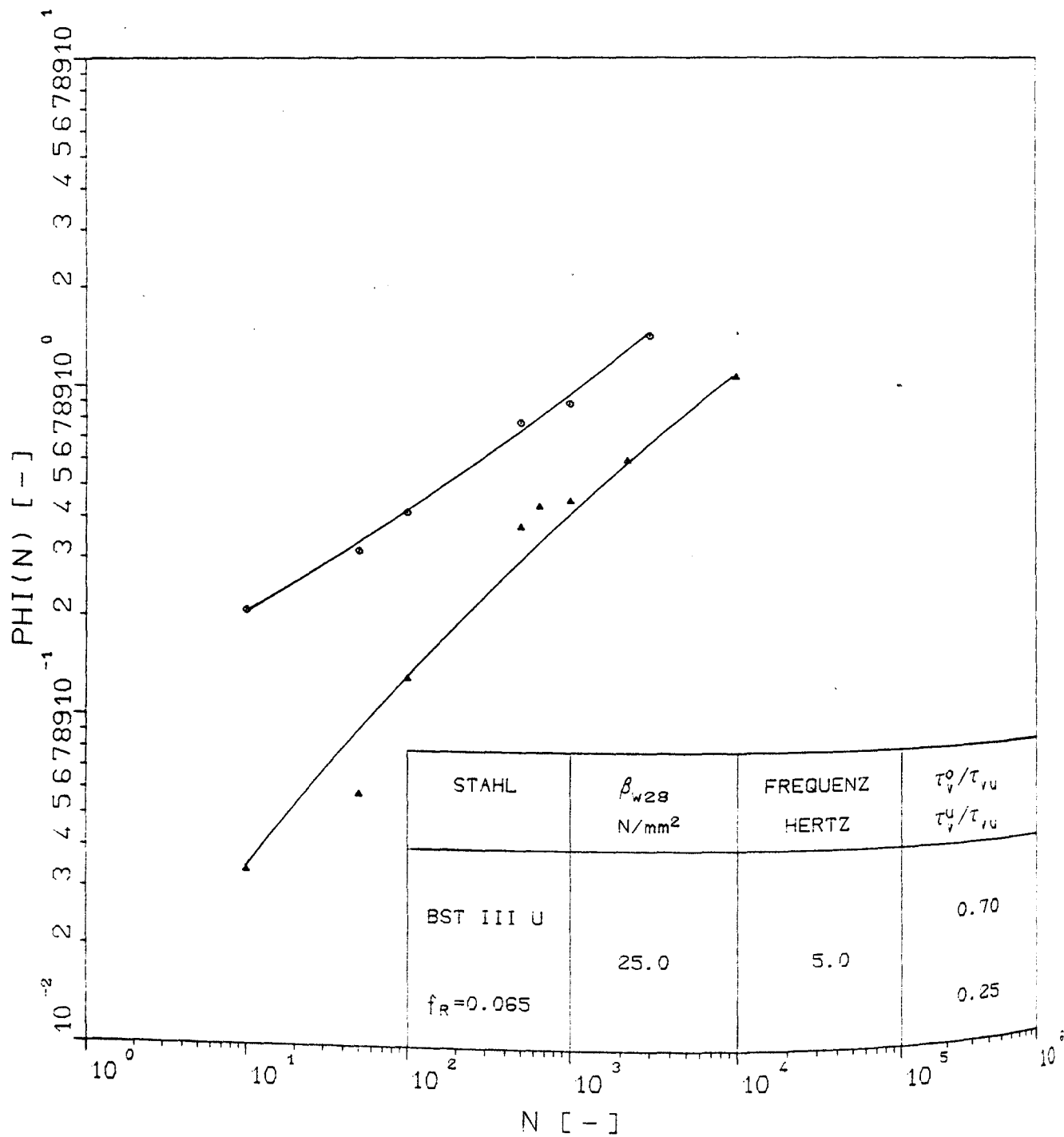
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche AKZ25.07 und AKZ25.11, Belastungsalter $T_0 = 14$ Tage



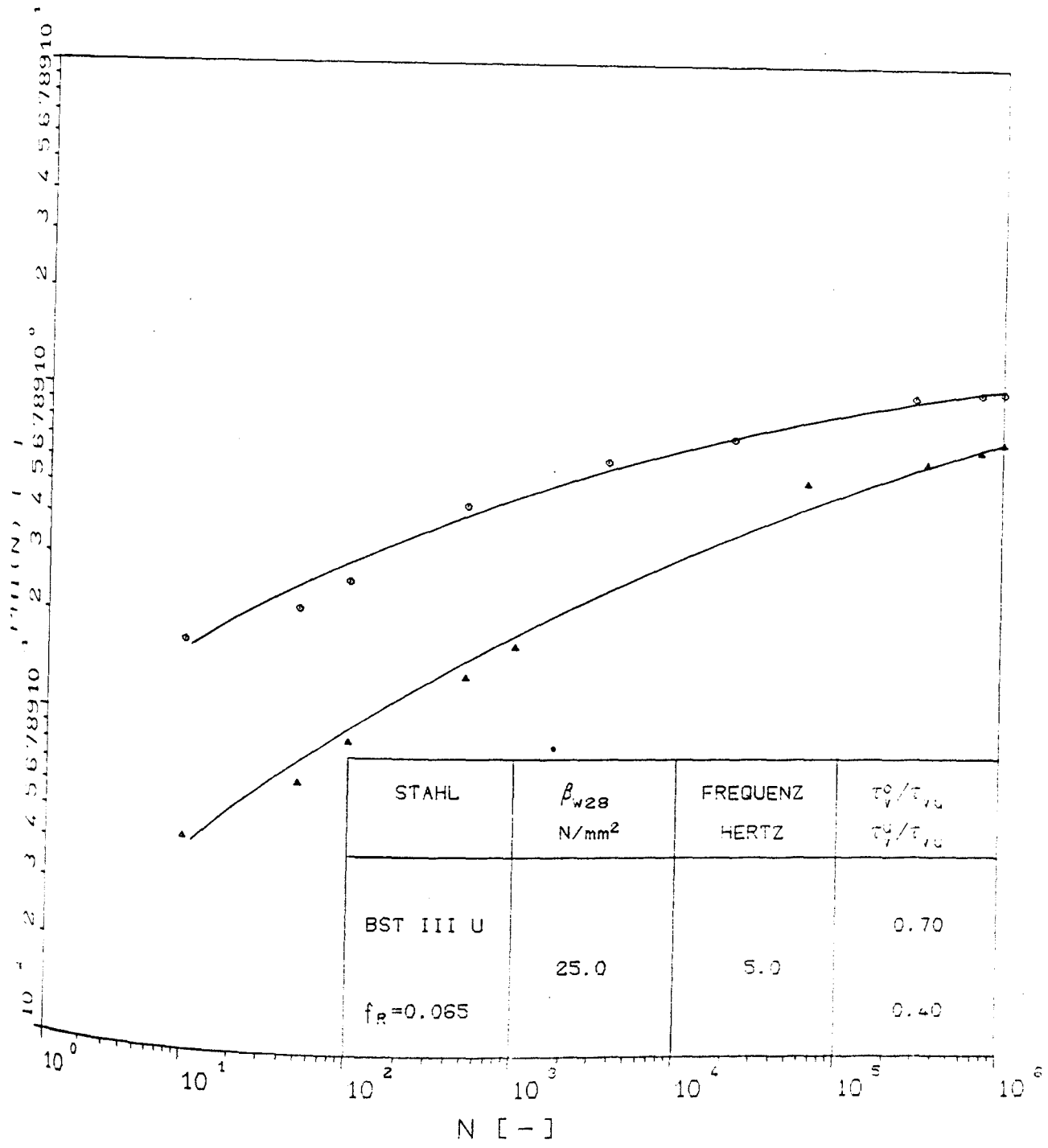
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche AKZ25.09 und AKZ25.20, Belastungsalter $T_0 = 28$ Tage



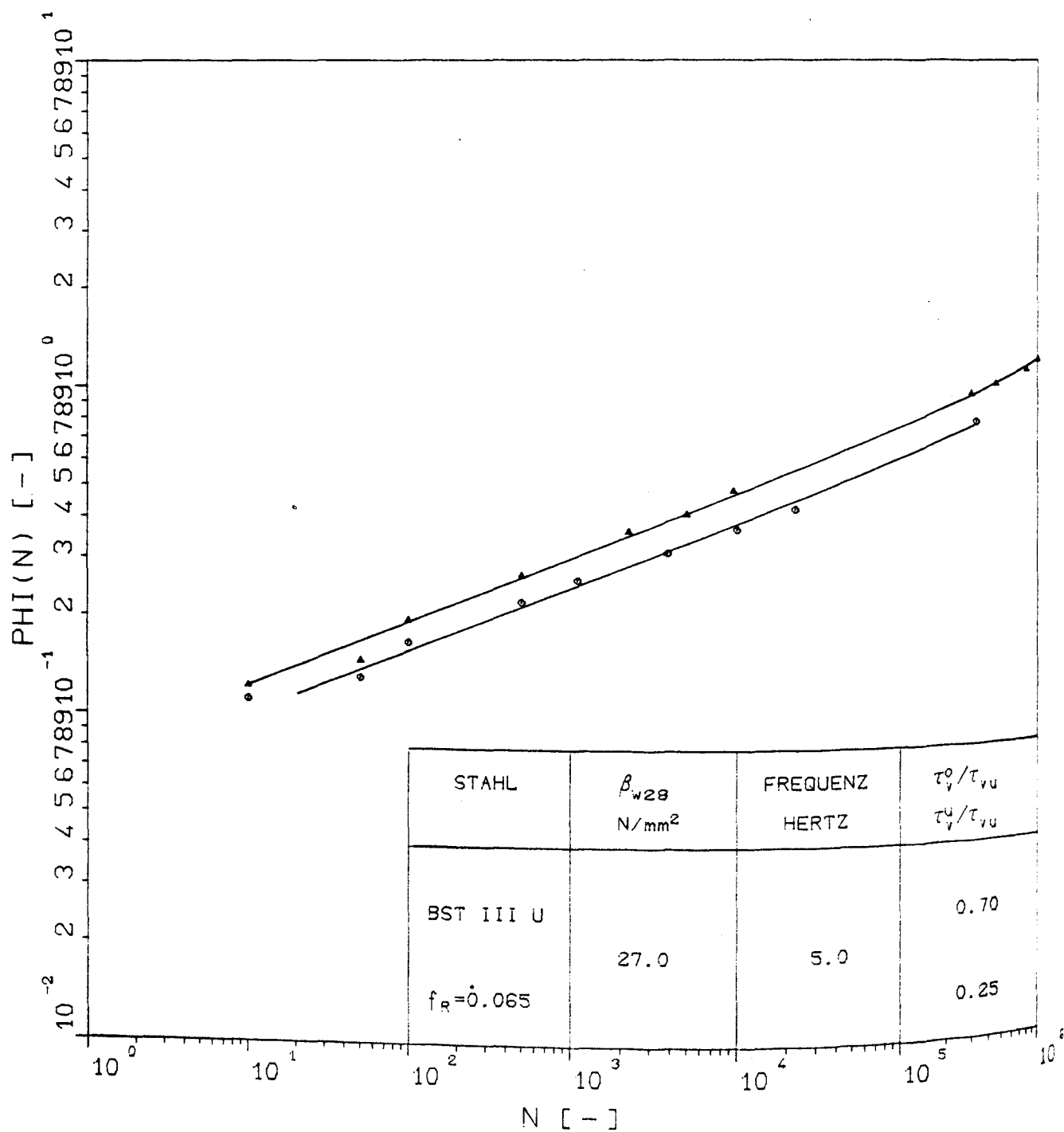
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für den Versuch
AK25.19, Belastungsalter $T_0 = 28$ Tage



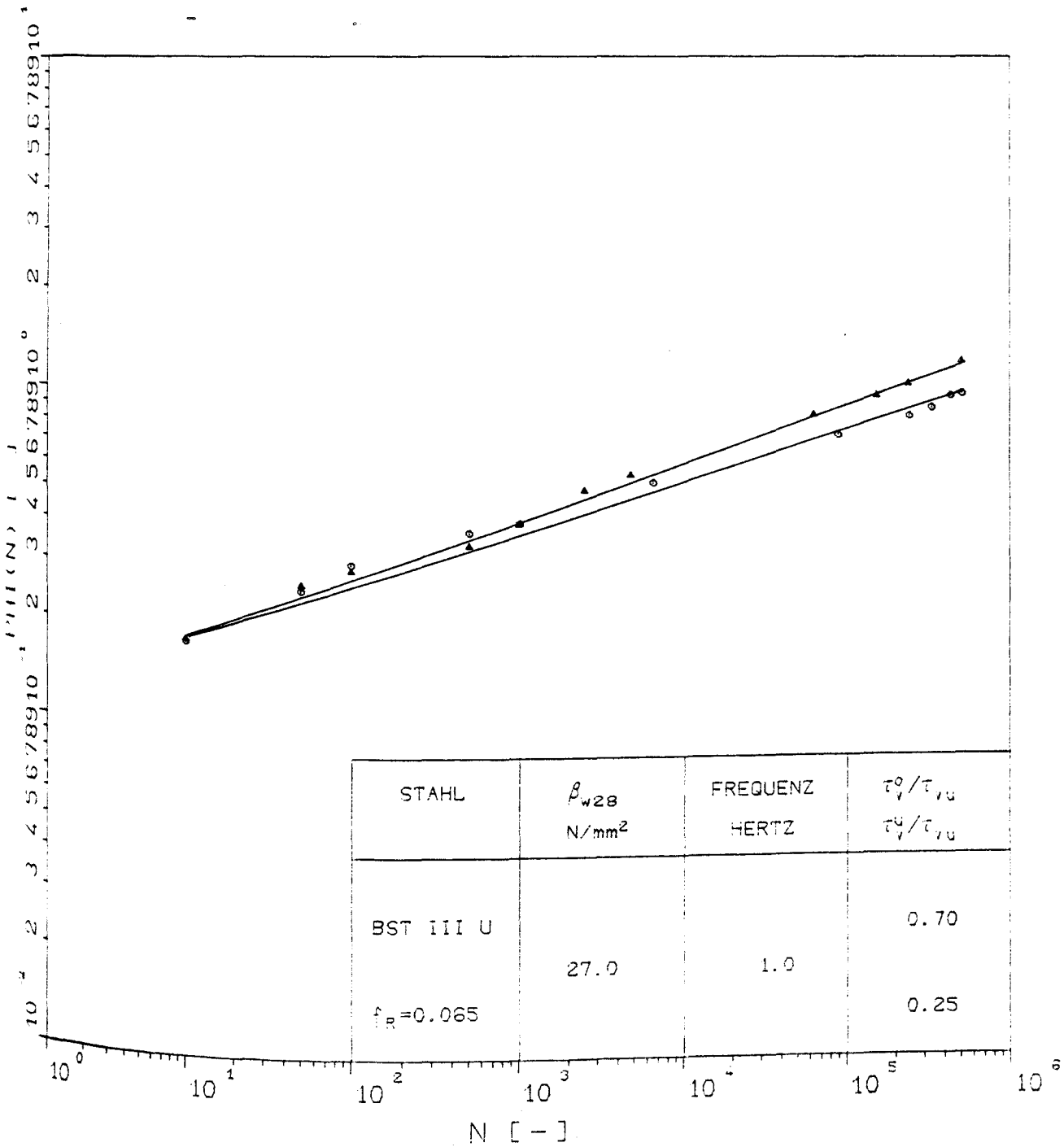
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche
AKE6.02 und AKE6.03, Randlage 1 d_s



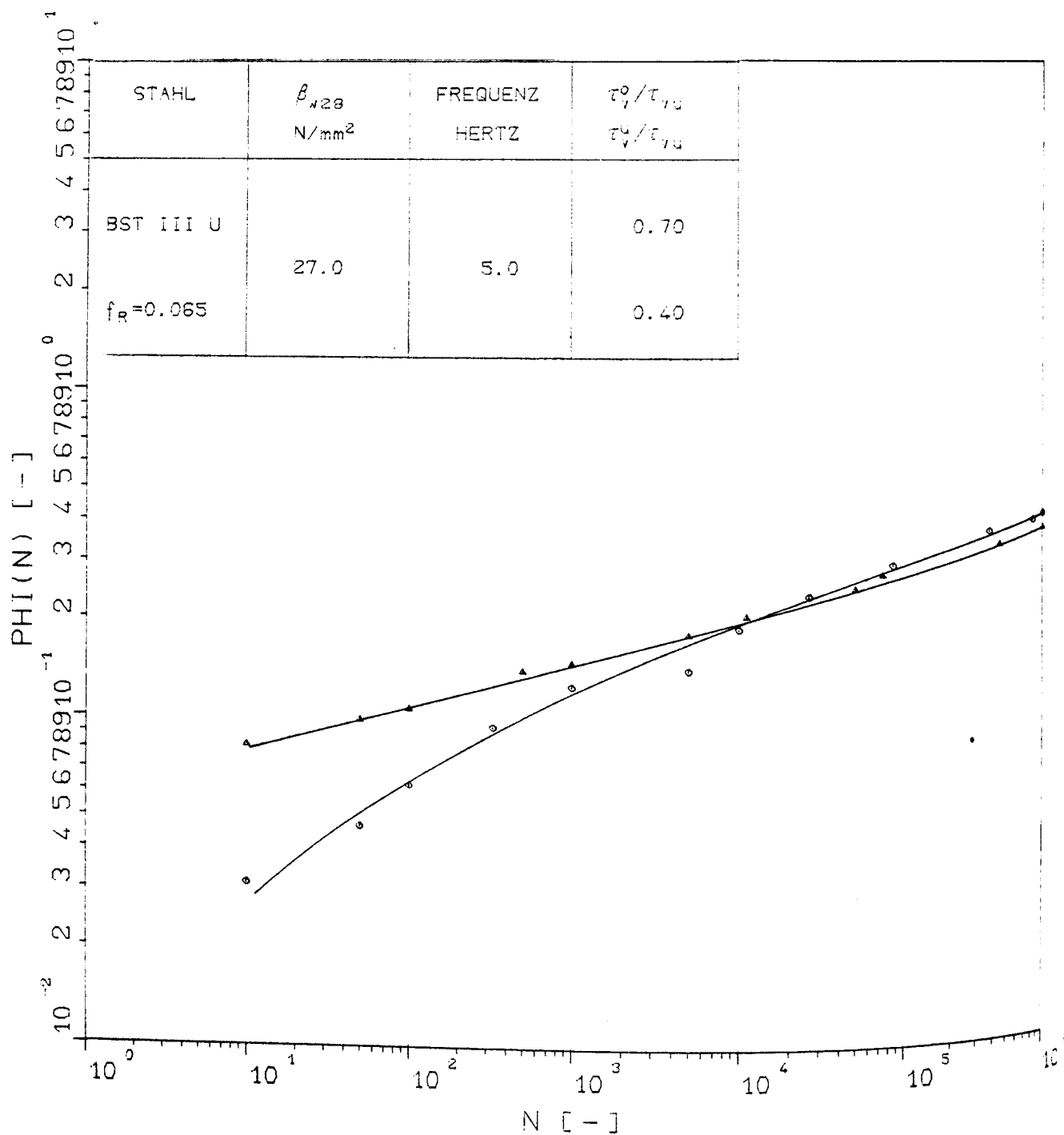
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche AKE6.05 und AKE6.06, Randlage 1 d_s



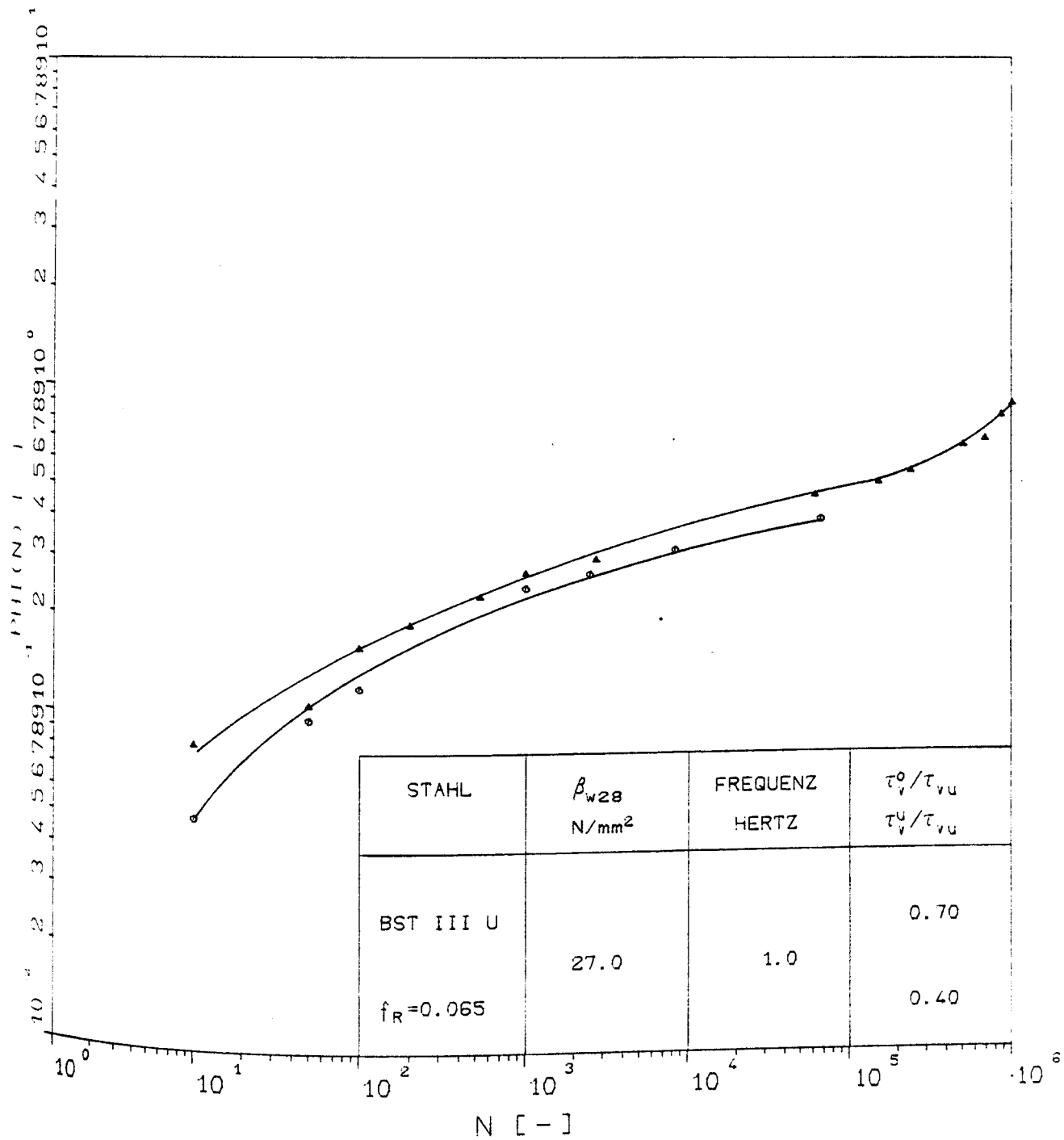
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche
AKE8.04 und AKE8.09, Ecklage 2, ds



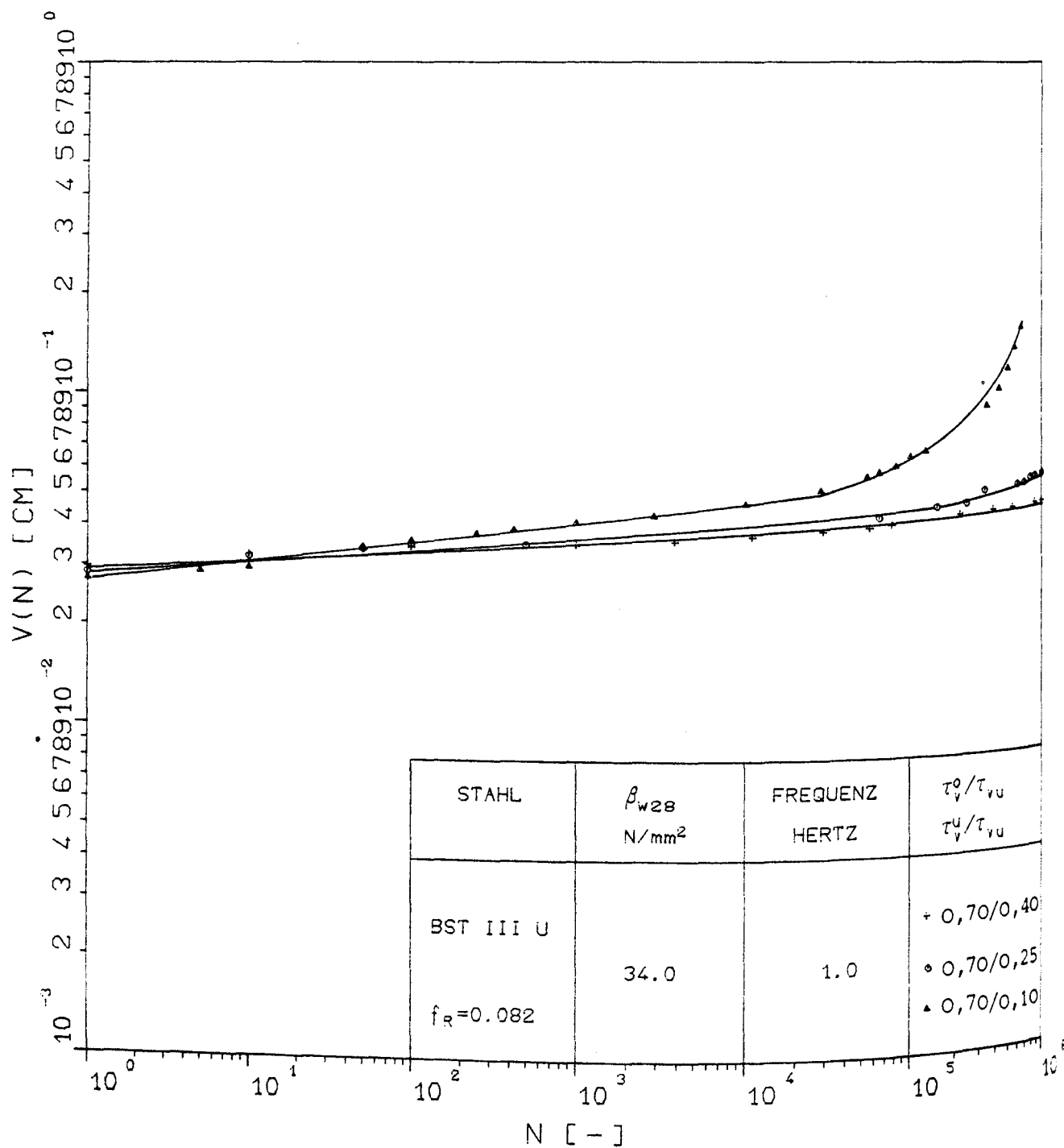
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche AKE8.01 und AKE8.07, Ecklage 2 ds



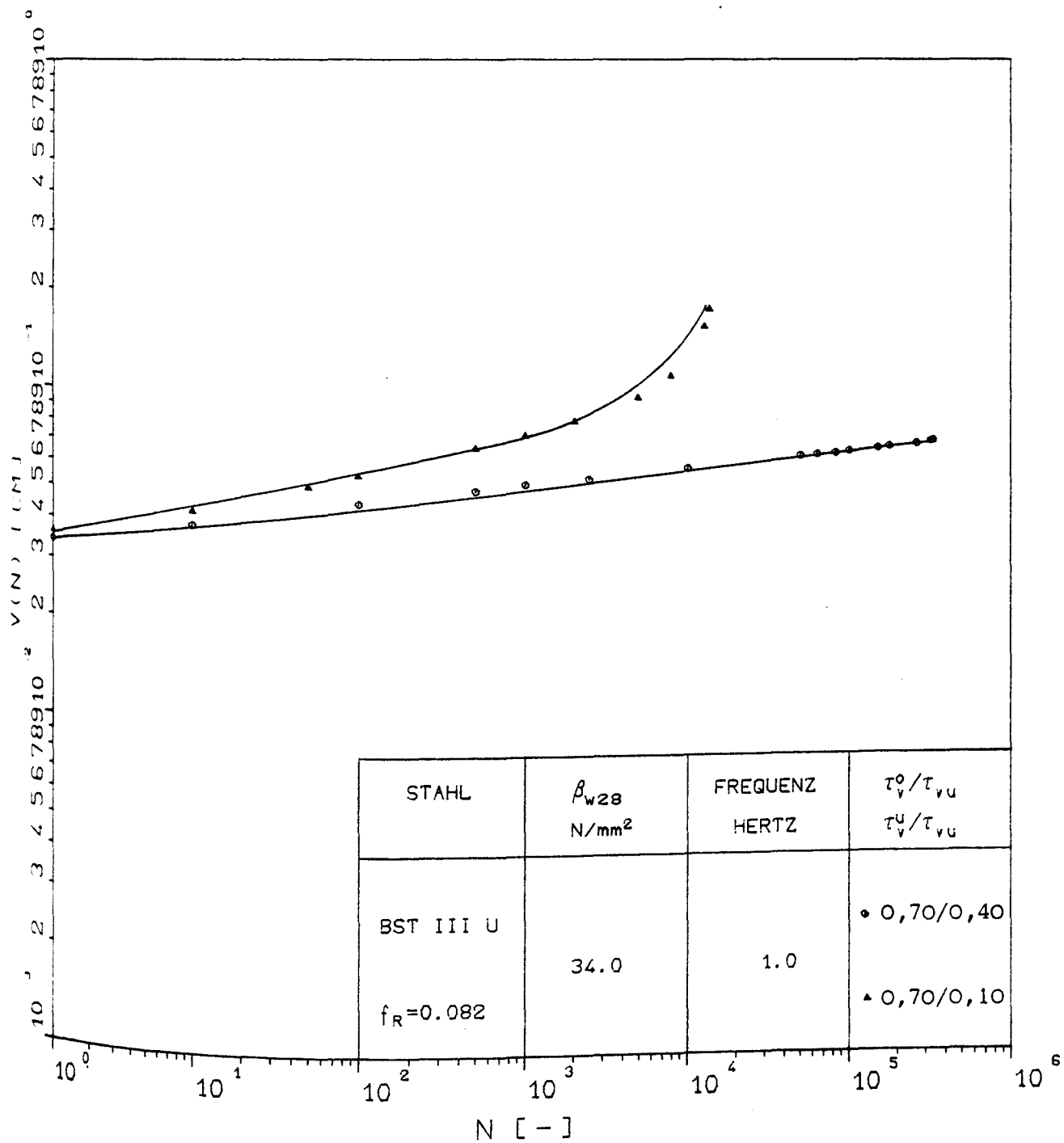
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche
AKE8.03 und AKE8.14, Ecklage 2 d_s



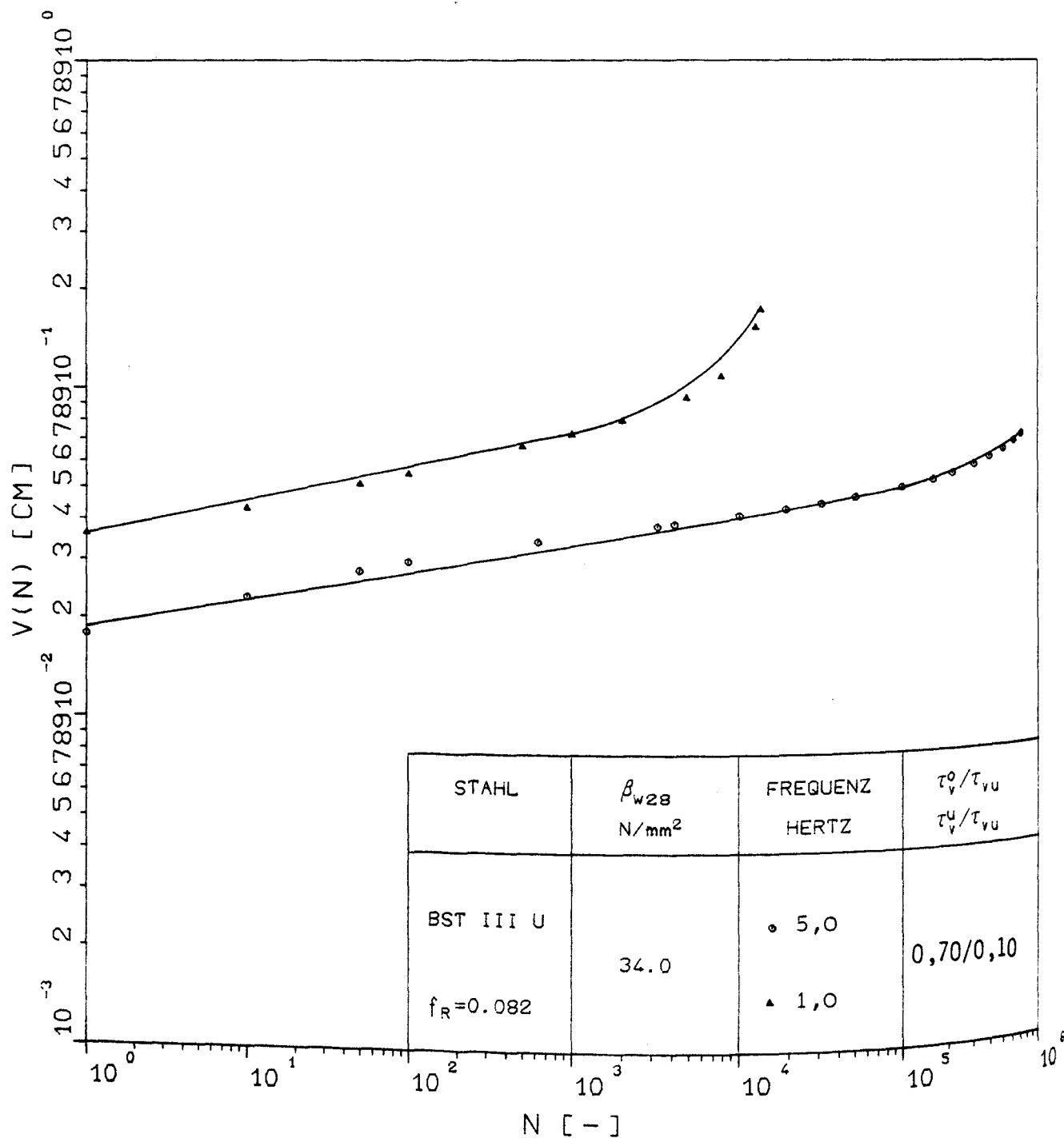
Verlauf der Kriechzahl in Abhängigkeit von der Lastspielzahl für die Versuche AKE8.02 und AKE8.10, Ecklage 2 ds



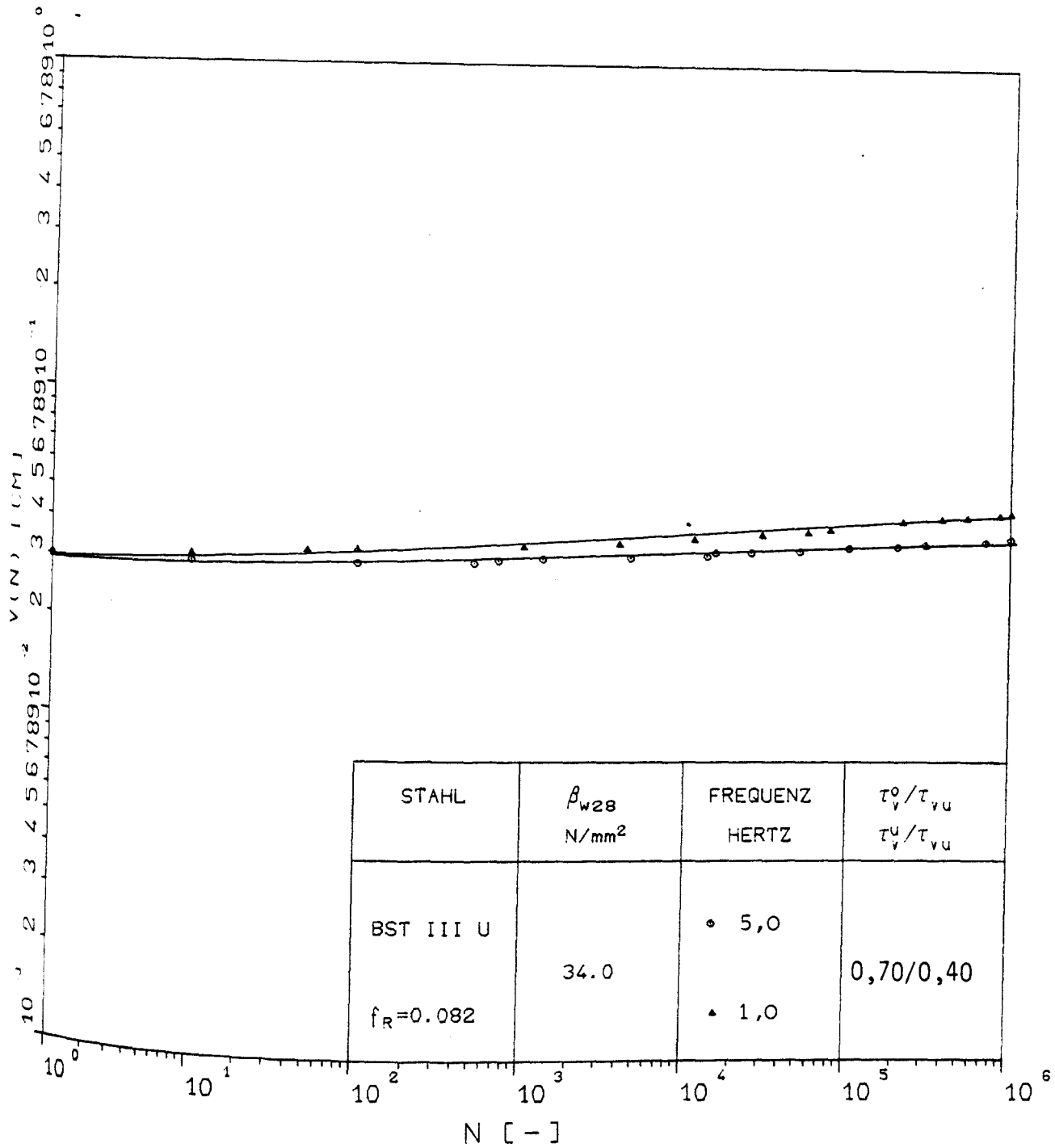
Einfluß der Schwingbreite auf die Verschiebungszunahme unter Zugschwellbeanspruchung



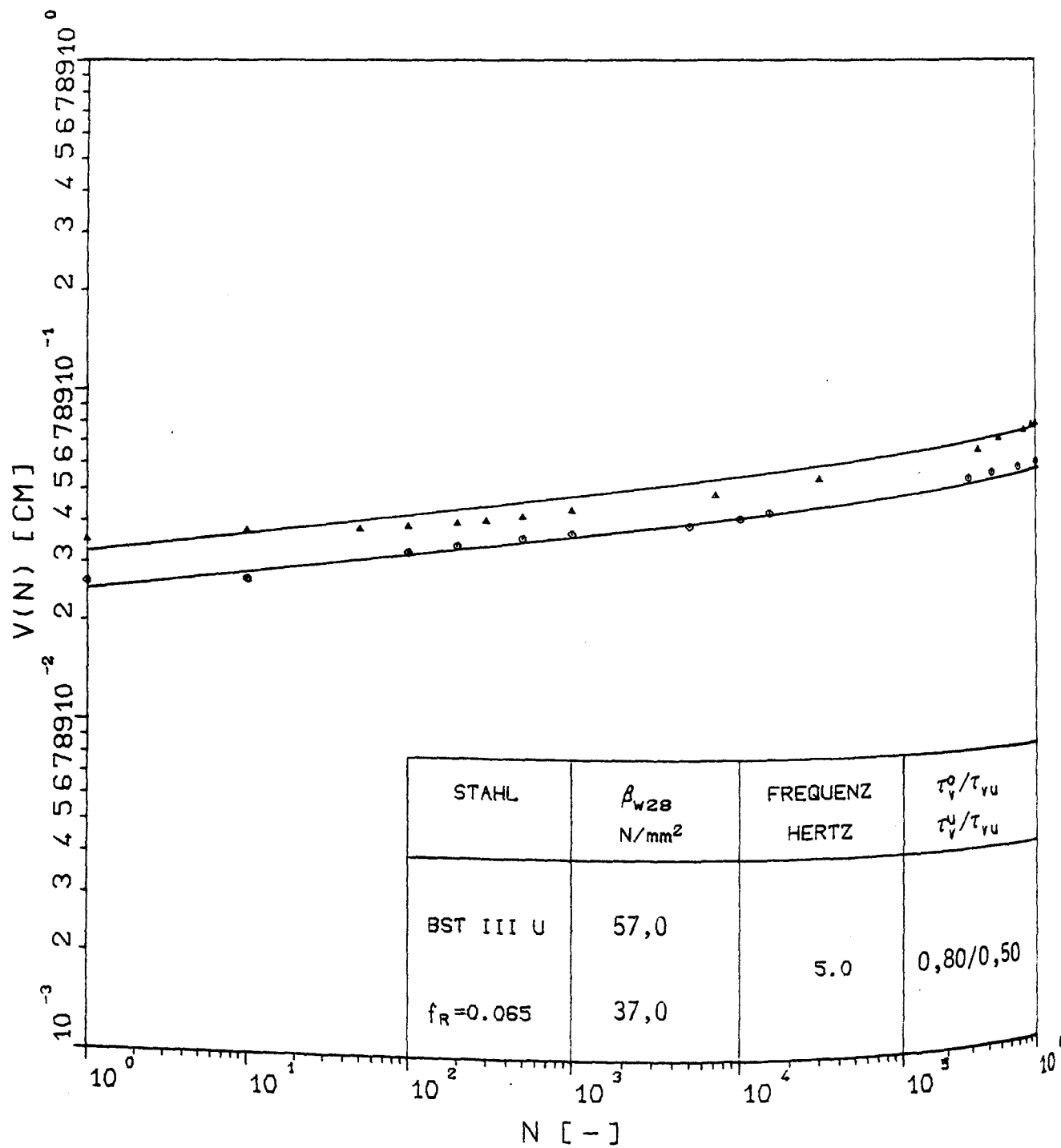
Einfluß der Schwingbreite auf die Verschiebungszunahme unter Zugschwellbeanspruchung



Einfluß der Frequenz auf die Verschiebungszunahme unter Zugschwellbeanspruchung



Einfluß der Frequenz auf die Verschiebungszunahme unter Zugschwellbeanspruchung

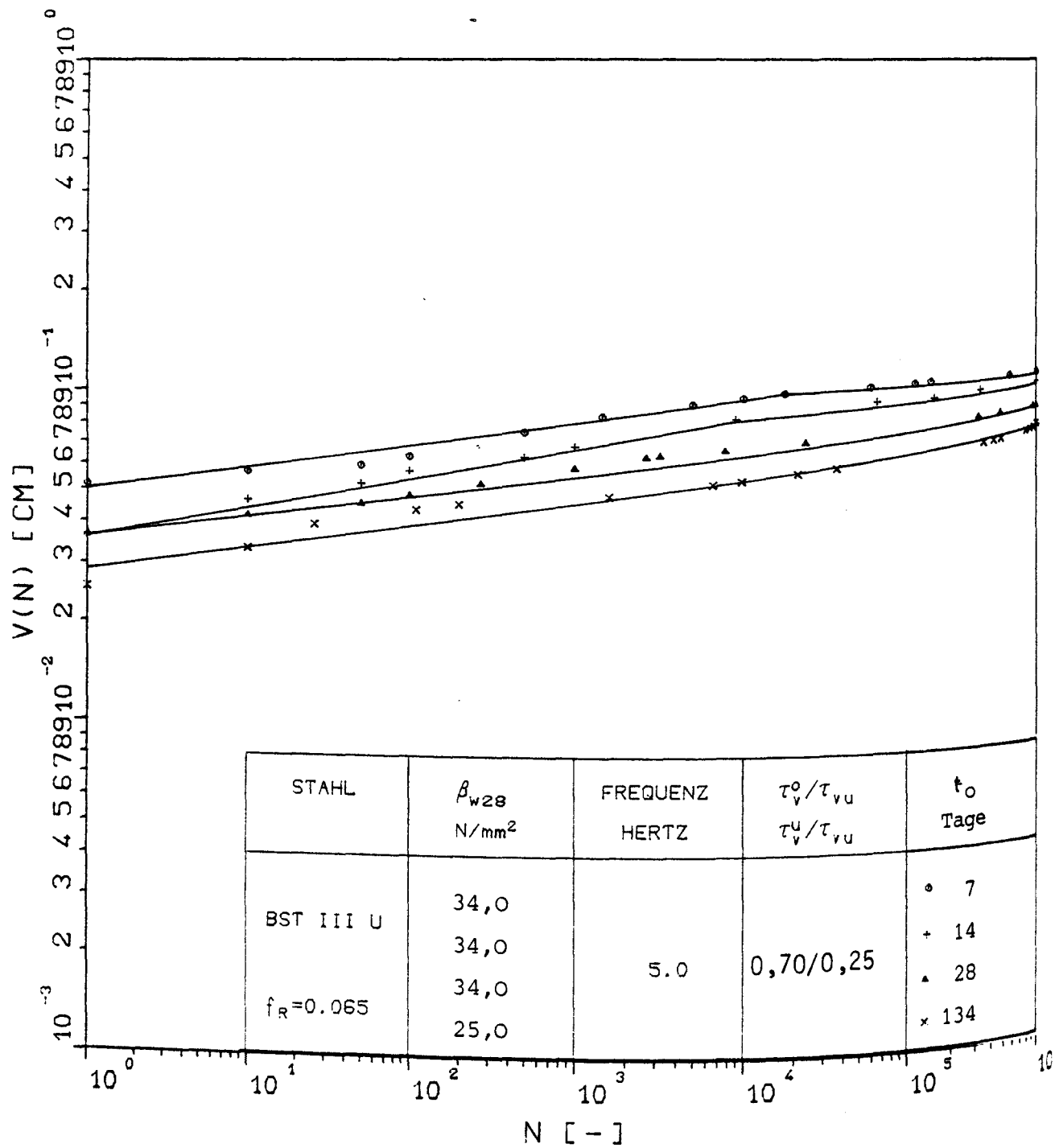


Einfluß der Betongüte auf die Verschiebungszunahme bei Zugschwellbeanspruchung

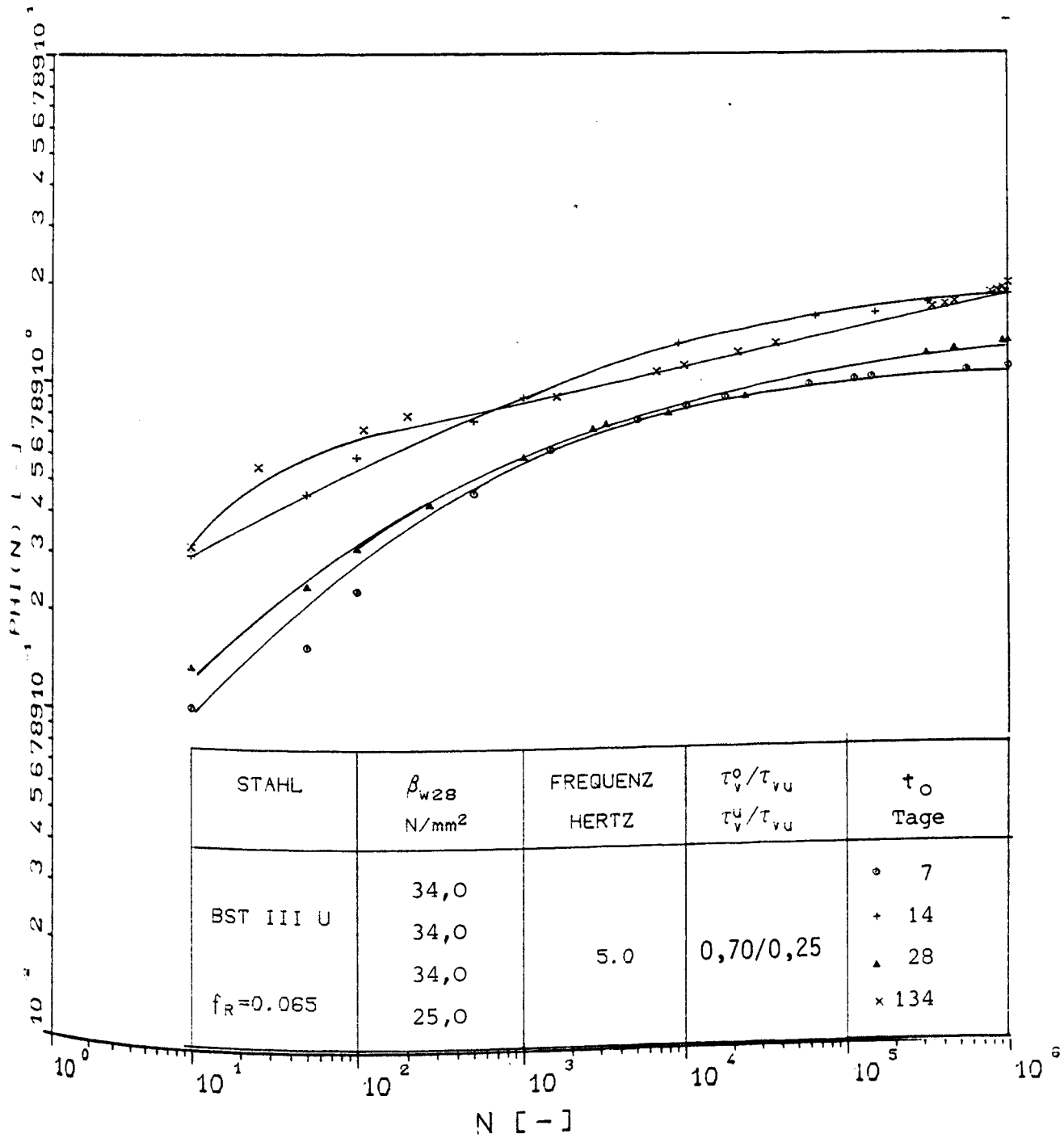
Festigkeits- und Belastungswerte für die in jungem Alter belasteten Proben

	AKZ25	AKZ25	AKZ25	AKZ25	AKZ25	AKZ12	AKZ12	AKZ19
Kurzzeitversuche								
$\tau_{vum}(t_0)$ N/mm ²	11,0	11,0	10,5	14,4	14,4	14,9	14,9	21,9
Zugschwellversuche								
Proben-Nr.	5;6	8	11;7	20;9*	19	11;15;18	7;14	3;8;16
τ_v^0 / τ_{vu} -	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
τ_v^u / τ_{vu} -	0,25	0,4	0,25	0,25	0,4	0,25	0,25	0,25
Frequenz Hertz	5	5	5	5	5	5	1	1
t_0 Tage	7	7	14	28	28	134	134	13
$\beta_w(t_0)$ N/mm ²	28,0	28,0	31,0	34,0	34,0	32,0	32,0	53,0

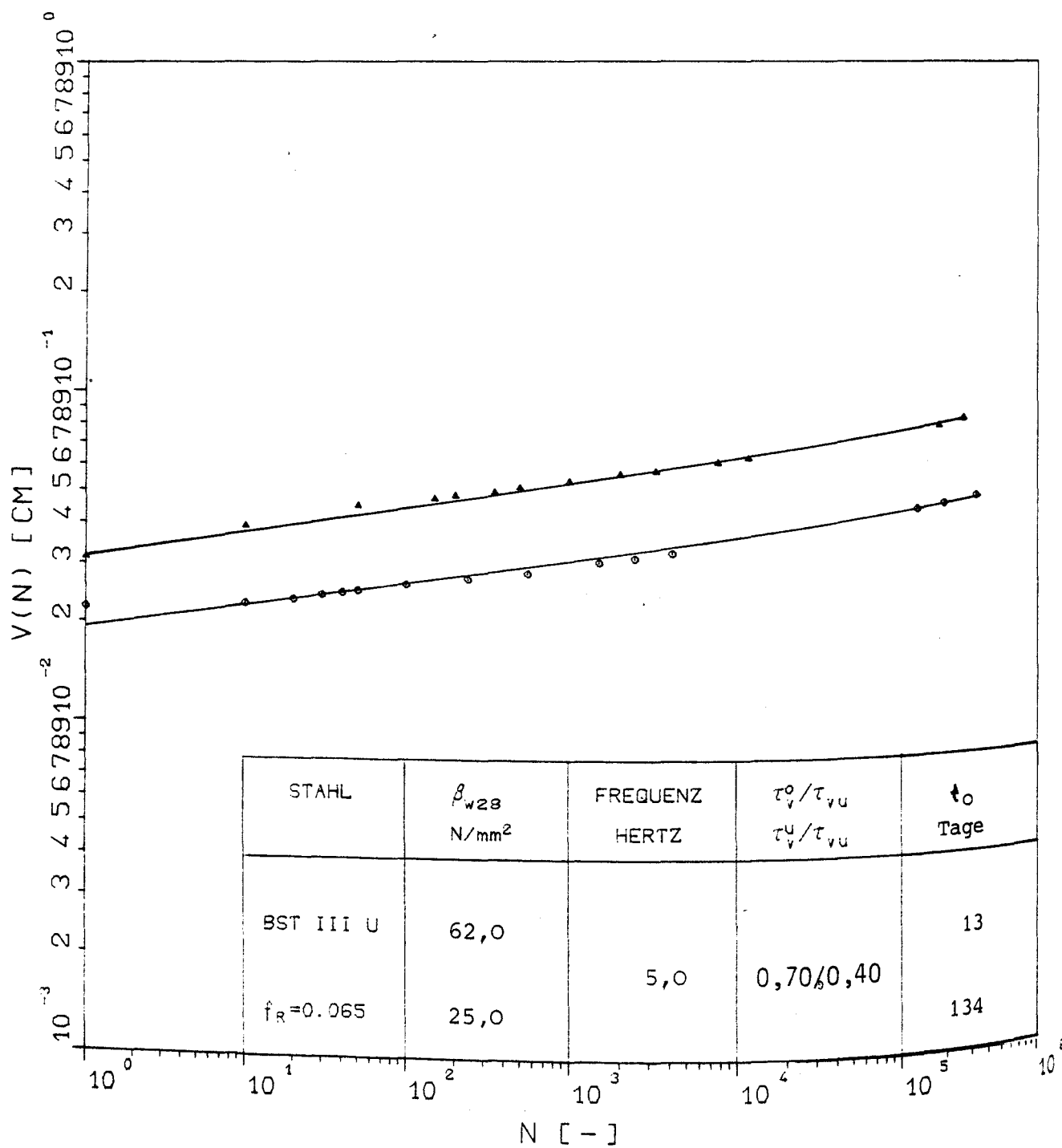
* bis 2660 Lastwechsel mit f=1 Hertz



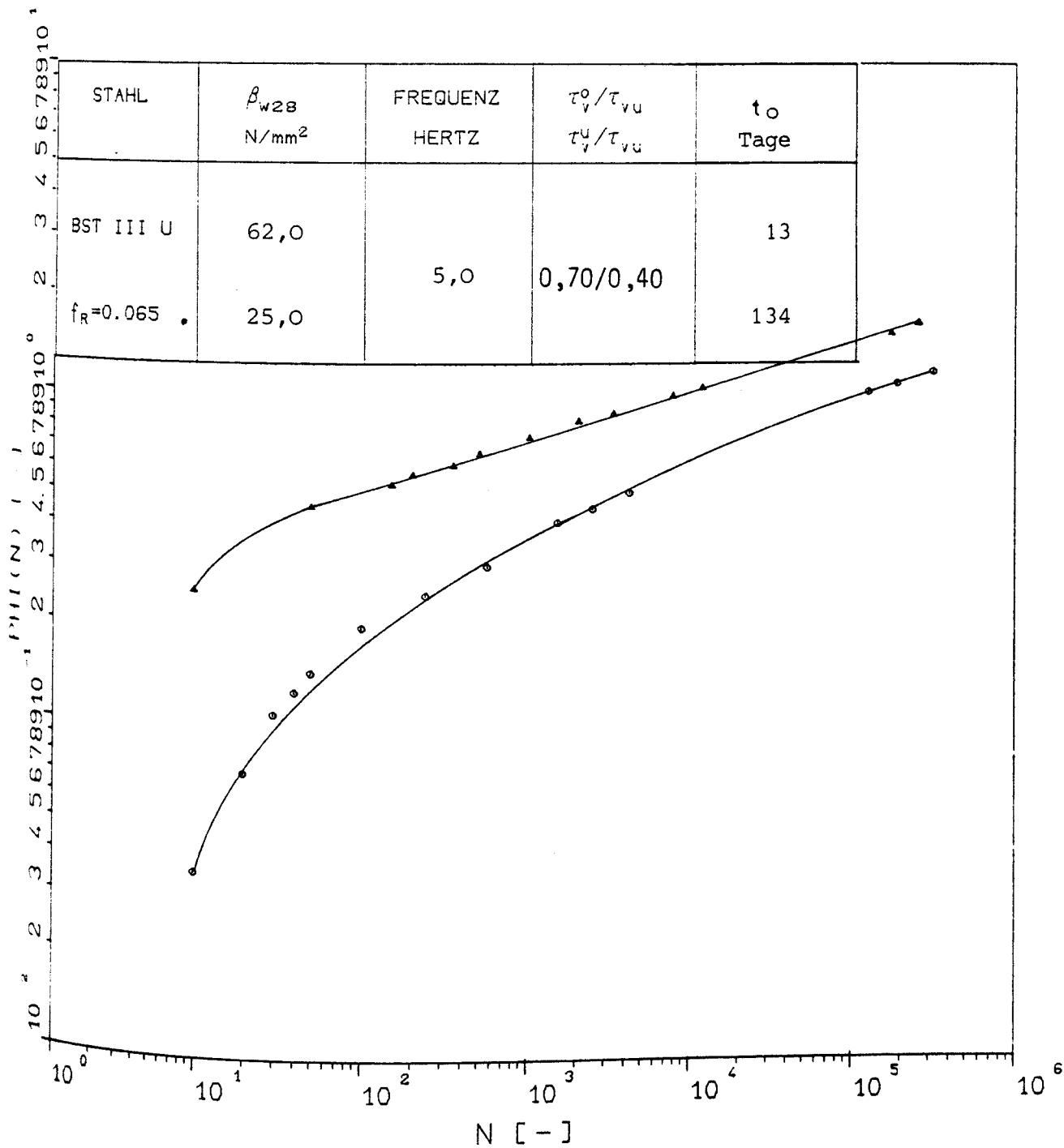
Einfluß des Belastungsalters auf die Verschiebungszunahme unter Zugschwellbeanspruchung



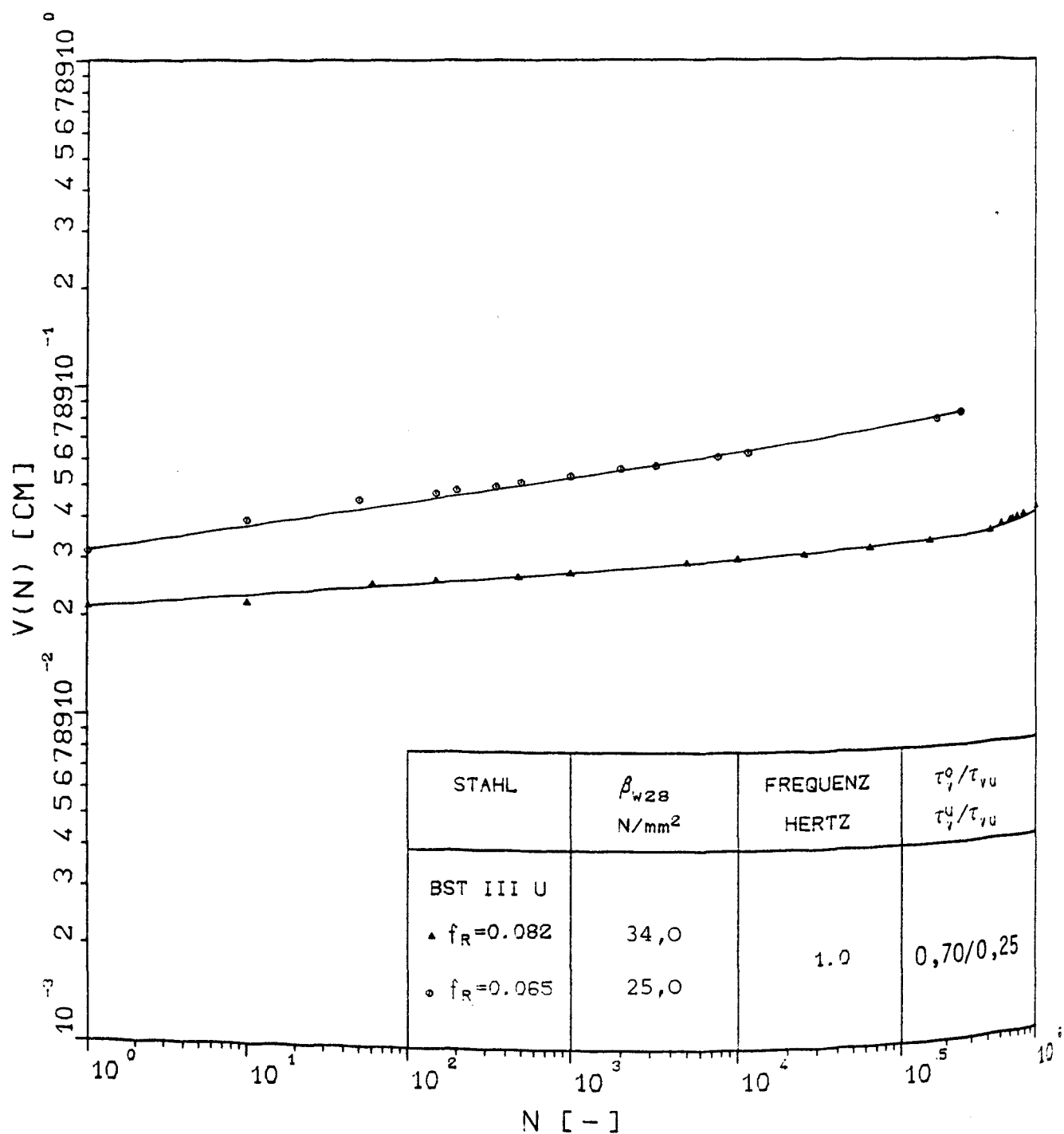
Einfluß des Belastungsalters auf die Kriechzahl bei Zugschwellbeanspruchung



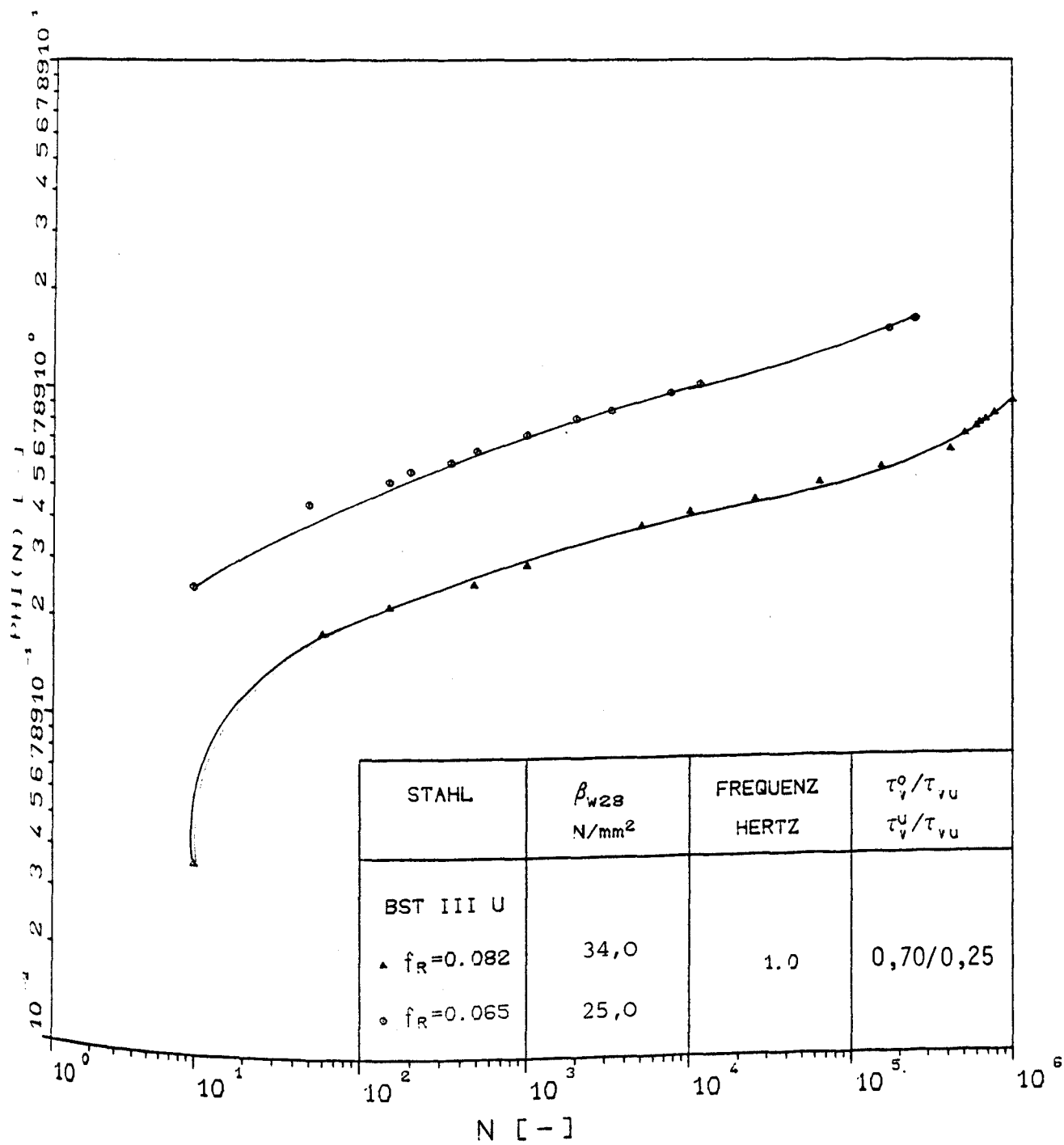
Einfluß des Belastungsalters auf die Verschiebungszunahme unter Zugschwellbeanspruchung



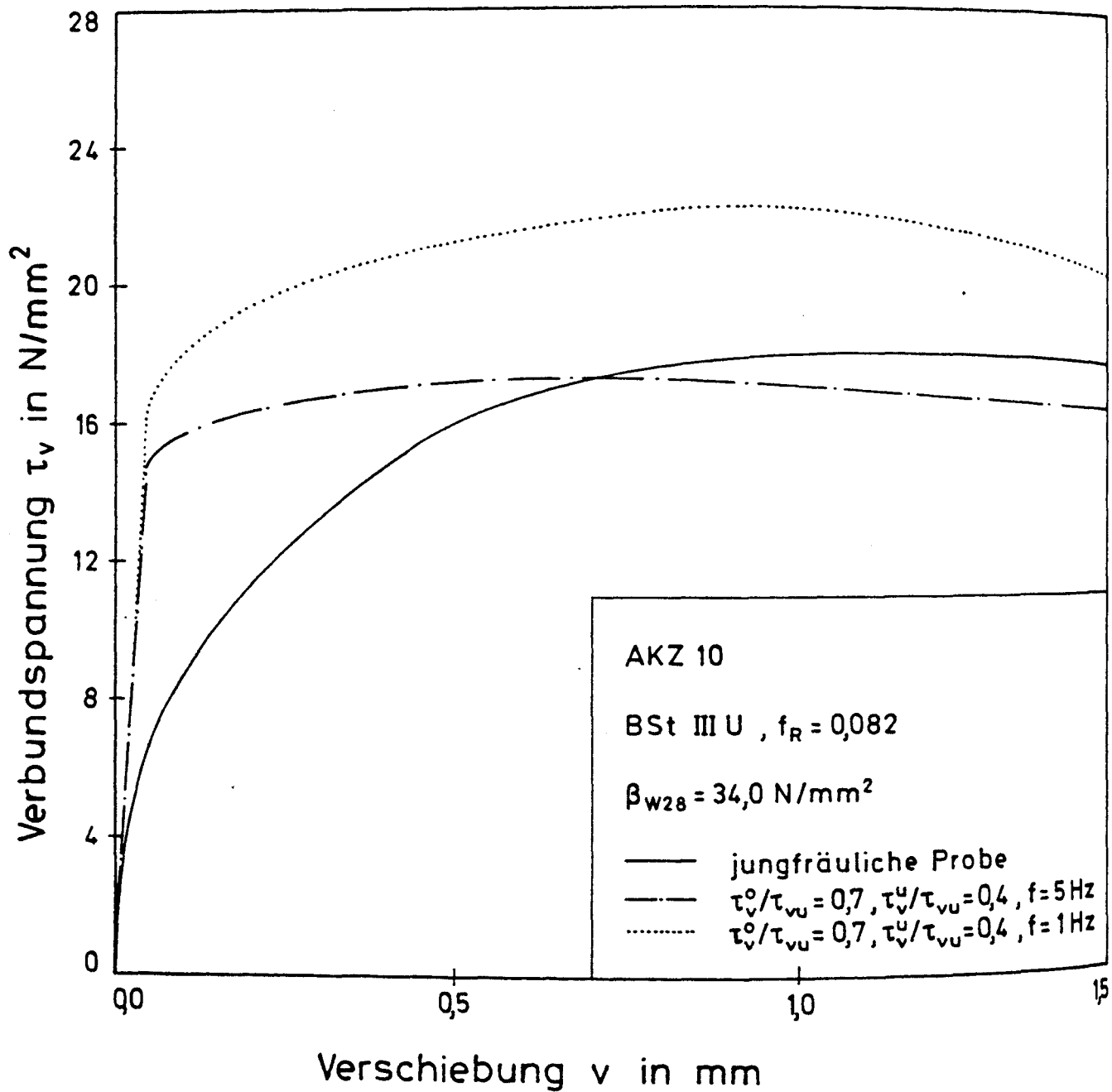
Einfluß des Belastungsalters auf die Kriechzahl bei Zugschwellbeanspruchung



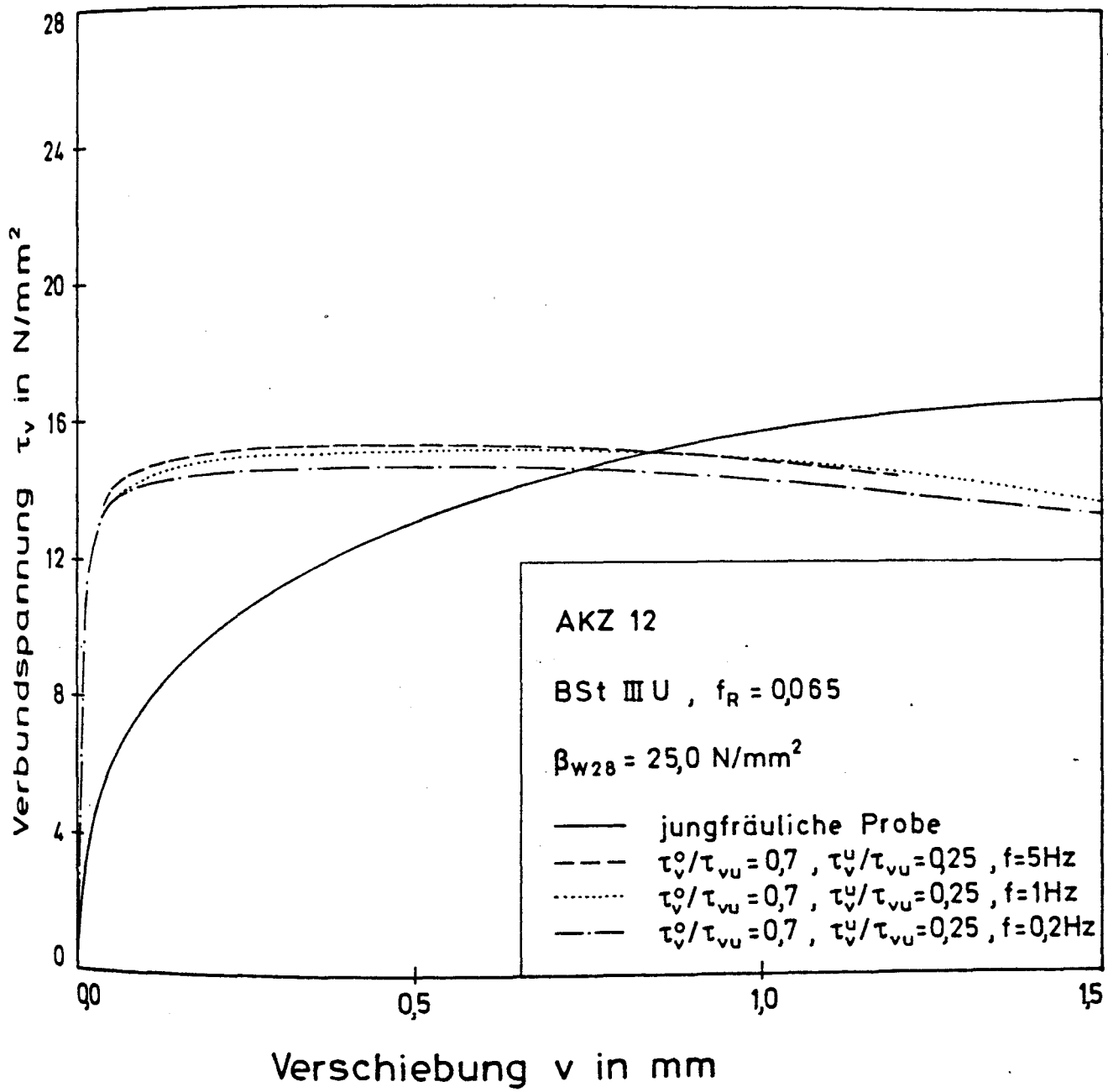
Einfluß der bezogenen Rippenfläche auf die Verschiebungszunahme unter Zug-
schwellbeanspruchung



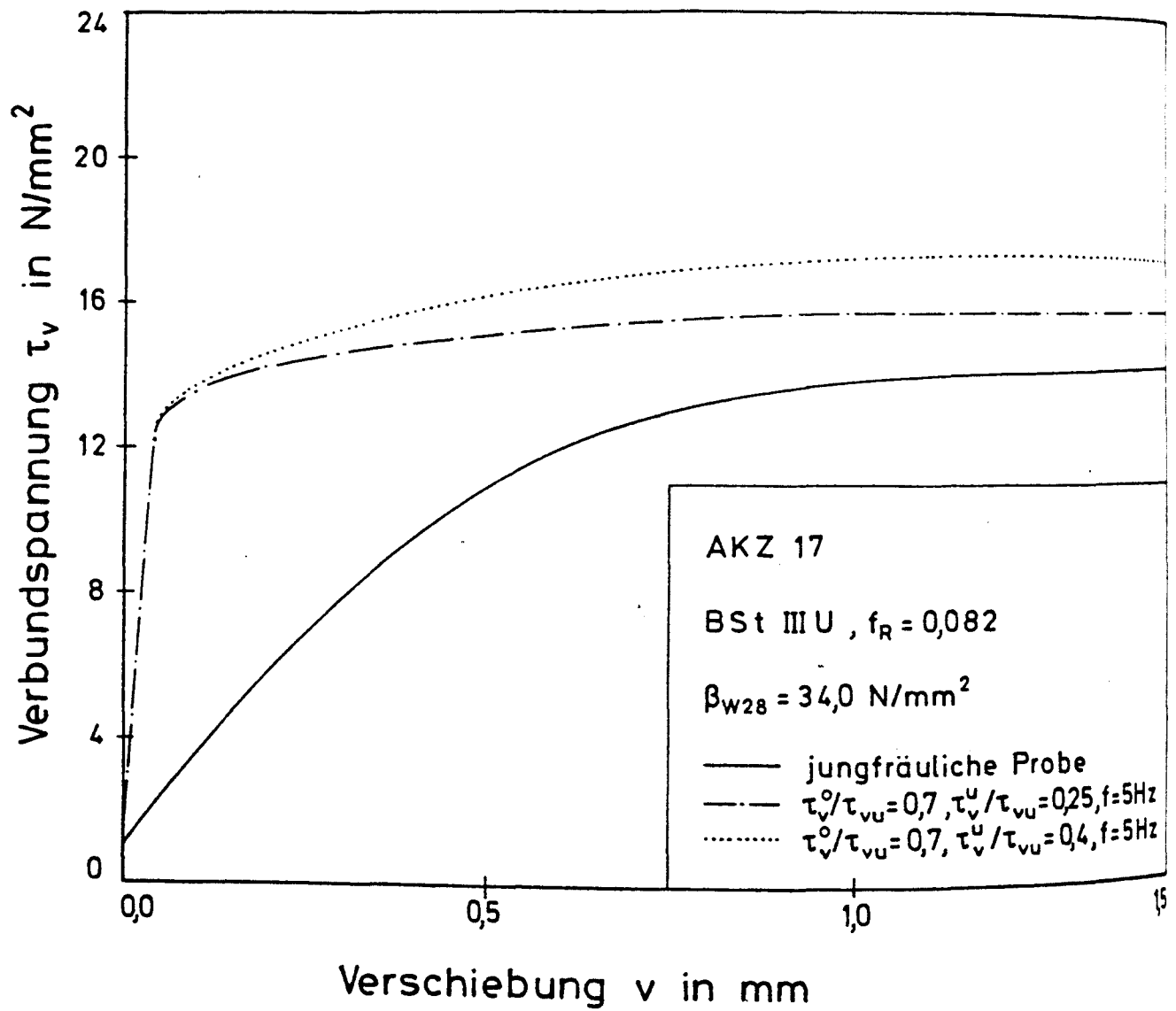
Einfluß der bezogenen Rippenfläche auf die Kriechzahl bei Zugschwellbeanspruchung



Vergleich der τ_v - v -Beziehungen jungfräulicher und vorbelasteter Versuchskörper der Serie AKZ10



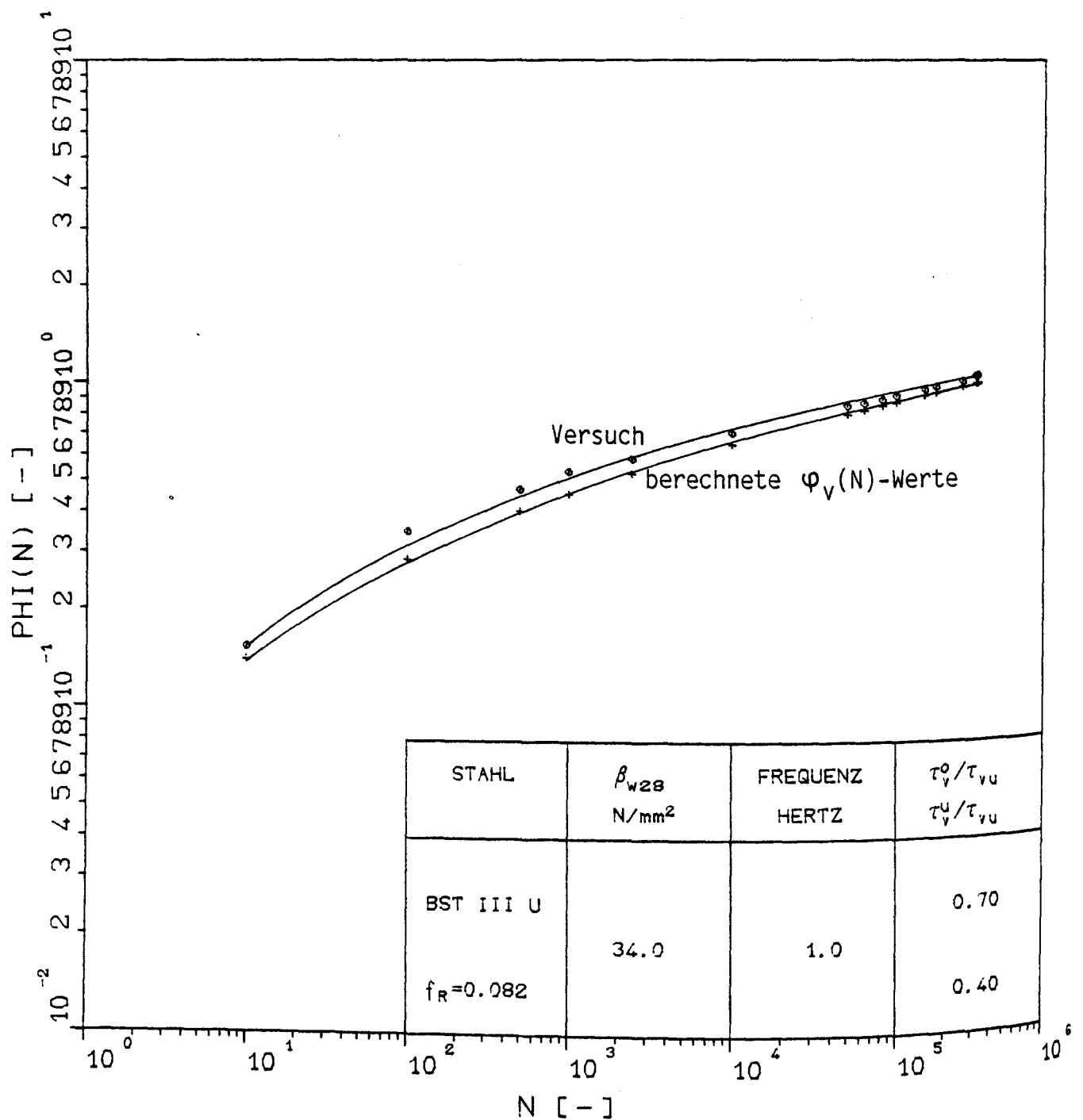
Vergleich der τ_v -v-Beziehungen jungfräulicher und vorbelasteter Versuchskörper der Serie AKZ12



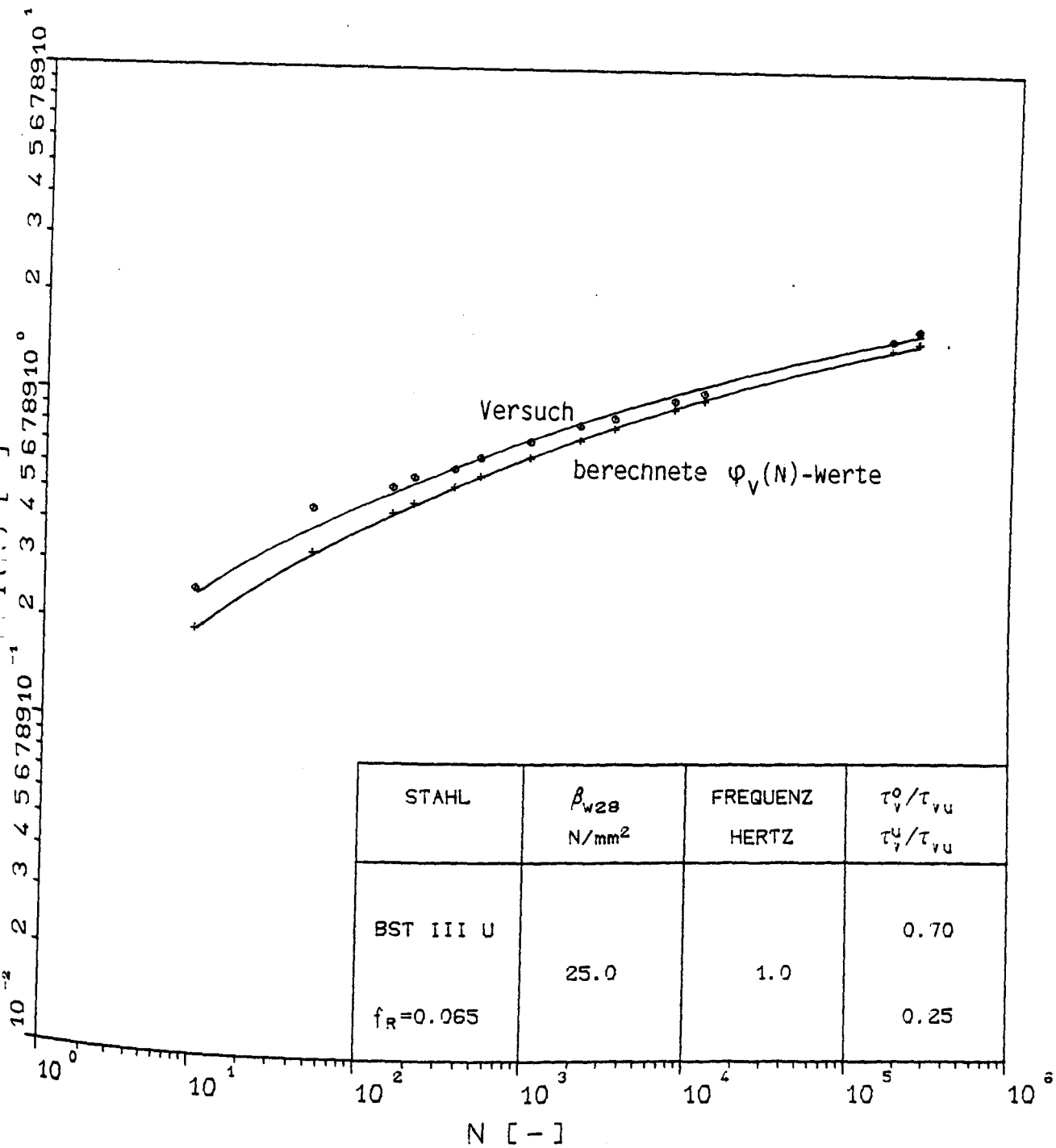
Vergleich der τ_v -v-Beziehungen jungfräulicher und vorbelasteter Versuchskörper der Serie AKZ17

Zusammenstellung der mittleren Verbundfestigkeiten jungfräulicher
 ($\tau_{\text{vum}}(t_0)$) und vorbelasteter Probekörper ($\tau_{\text{vum}}(N=10^6)$)

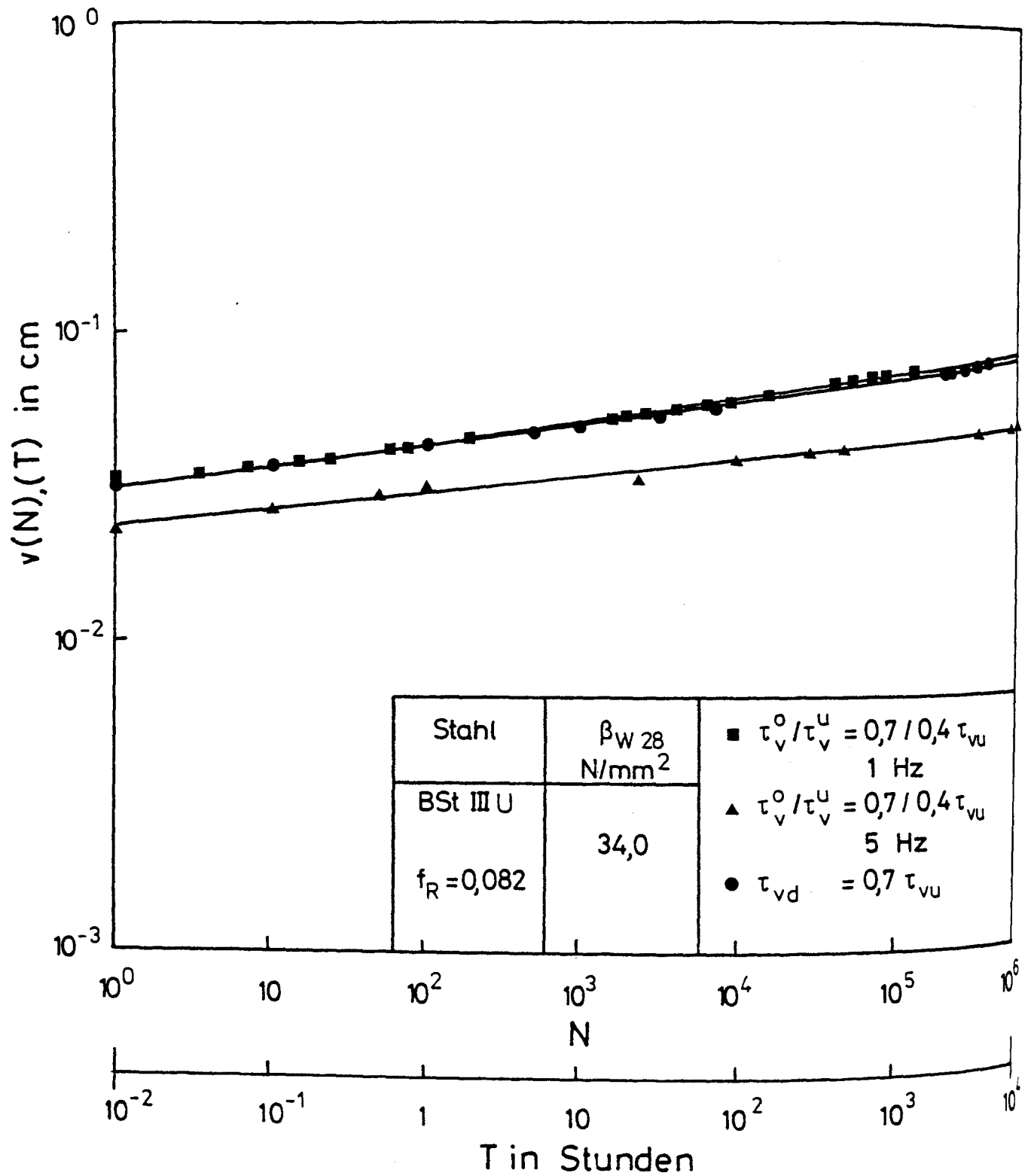
Betonier- serie	$\tau_{\text{vum}}(t_0)$ N/mm ²	$\tau_{\text{vum}}(N=10^6)$ N/mm ²	$\tau_{\text{vum}}(N=10^6)/$ $\tau_{\text{vum}}(t_0)$
AKZ10	17,5	20,0	1,14
AKZ12	15,3	15,3	1,00
AKZ17	15,4	17,0	1,11
AKZ19	21,9	22,9	1,05
AKZ20	17,2	19,9	1,16
AKZ21	29,8	32,4	1,09
AKZ24	20,2	20,8	1,03
AKZ25 ($t_0 = 7\text{d}$)	11,0	12,7	1,15
AKZ25 ($t_0 = 14\text{d}$)	10,5	12,8	1,22
AKZ25 ($t_0 = 28\text{d}$)	14,4	15,2	1,05
AKE6	11,2	9,7	0,87
AKE8	11,0	10,8	0,98



Vergleich von Versuchsergebnissen mit nach Ansatz 10.3 berechneten Kriechzahlen
(Versuch AKZ10.08)



Vergleich von Versuchsergebnissen mit nach Ansatz 10.3 berechneten Kriechzahlen
(Versuch 12.07)



Vergleich von Versuchsergebnissen der Schwellversuche und der Kriechversuche unter konstanter Dauerlast, Serie AKZ10

TEIL III

Versuche zur Sichtbarmachung der inneren Rißbildung

TEIL III

Versuche zur Sichtbarmachung der inneren Rißbildung

1. Problemstellung und Ziel der Versuche
2. Bisherige Versuche zur Sichtbarmachung von inneren Rissen
 - 2.1 Versuche von Broms
 - 2.2 Versuche von Goto
 - 2.3 Versuche von Illston und Stevens
 - 2.4 Versuche von Trost, Cordes, Thormählen und Hagen
 - 2.5 Versuche von Kupfer, Janovic und Müller
 - 2.6 Versuche von Oostveen sowie Hungspreug
3. Eigene Versuche
 - 3.1 Versuchskörper
 - 3.2 Versuchsmaterial
 - 3.2.1 Bewehrungsstahl
 - 3.2.2 Beton, Mörtel
 - 3.2.3 Abdichtung, Injektionsgut
 - 3.3 Versuchsdurchführung
4. Versuchsergebnisse
5. Zusammenfassung

1. PROBLEMSTELLUNG UND ZIEL DER VERSUCHE

Ein wirksamer Verbund ist eine wesentliche Voraussetzung für das Gebrauchsverhalten und die Tragfähigkeit von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen. Die Gebrauchsfähigkeit der Bauteile wird vor allem durch eine wirksame Beschränkung der Rißbreiten gewährleistet.

Beim Auftreten eines Risses, z.B. in einem Biegebauteil, wird die Stahlzugkraft im Riß über Verbund entlang einer Einleitungsstrecke l_v wieder in den Beton eingetragen. Dieser Vorgang gilt nicht nur für die Erstrißbildung sondern prinzipiell auch für die Folgerisse /1/. Je steifer der Verbund, umso kürzer ist die Strecke l_v und umso geringer sind die Verschiebungen zwischen Stahl und Beton und damit die Rißbreite.

Die Relativverschiebung $v(x)$ zwischen Bewehrungsstab und Beton wird global als Integral der Dehnungsdifferenz $\Delta \epsilon(x) = \epsilon_s(x) - \epsilon_b(x)$ beschrieben. Tatsächlich setzt sie sich auch noch aus anderen Beiträgen zusammen. Der Feinmörtel wird unter den Rippen konsolidiert, und es entstehen Mikrorisse (Gotorisse). Mit der Rißbildung ist eine Ablösung des Betons von der Staboberfläche verknüpft.

Beim Ausziehversuch wird nur ein summarischer Zusammenhang zwischen der Kraft und der Endverschiebung v_E gefunden. Aus welchen Anteilen sich die Verschiebung zusammensetzt, bleibt verborgen. Es werden nur einige Auskünfte zur physikalischen Natur des Verbundes gesammelt (z.B. Ent- und Wiederbelastungslinie, Verhalten nach Verbundkriechversuch u.a.). Auch ist die übliche Annahme konstanter Schubspannungen innerhalb der Verbundstrecke l_v sicher nur eine grobe Näherung.

Es ist eines der Teilziele des Vorhabens, den Zusammenhang zwischen der Stahl- und Verbundspannungsverteilung in der Umgebung von Primärrissen und der inneren Rißbildung zu beleuchten. Dies ist nötig, um auch die Übertragbarkeit von an einfachen Versuchskörpern ge-

fundenen Verbundgesetzen auf Bauteile beurteilen zu können. Dieser Teilbericht befaßt sich mit der inneren Rißbildung und deren Sichtbarmachung.

2. BISHERIGE VERSUCHE ZUR SICHTBARMACHUNG VON INNEREN RISSEN

2.1 Versuche von Broms

Broms /2/ untersuchte zentrisch bewehrte Dehnkörper ($d_s = 25 \text{ mm}$) mit einer Länge $L = 20,3 \text{ cm}$, in denen parallel zum Bewehrungsstab ein Kanal zum Injizieren von Kunstharz verlief. Die Betondruckfestigkeit der Probekörper lag zwischen $\beta_c = 27,7$ und 36 N/mm^2 . Um den Injizierkanal herzustellen, wurde vor dem Betonieren ein Neopren-Schlauch mit einem Außendurchmesser von $3,2 \text{ mm}$ in geringem Abstand vom Stahlstab angebracht. Der leicht angespannte Schlauch wurde durch Druckventile geführt und mit Klemmschrauben gehalten. Der Schalungsaufbau ist in Bild 2.1 dargestellt.

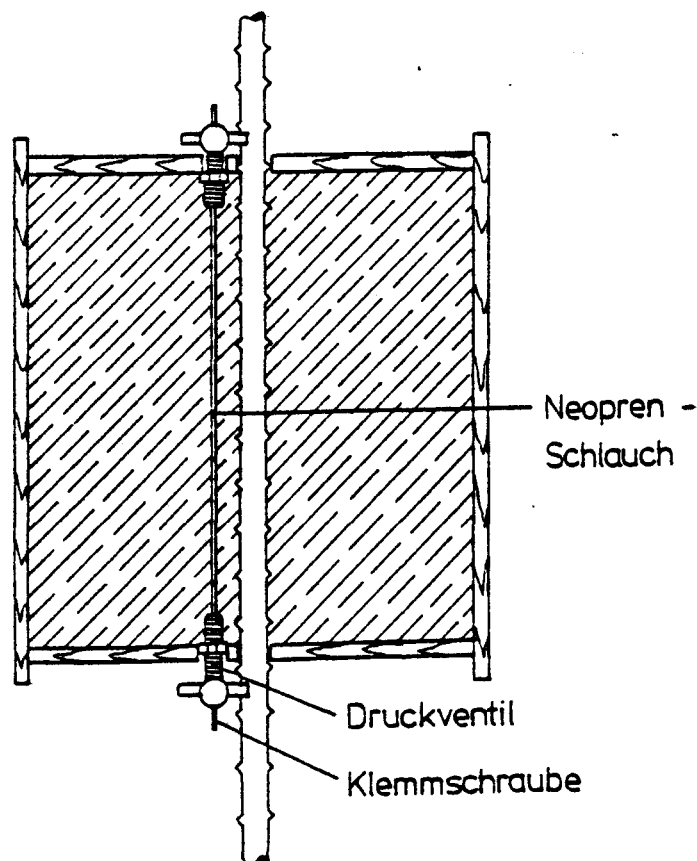


Bild 2.1 Schalung mit Vorrichtung zur Herstellung eines Injizierkanals nach Broms /2/

Einige Tage nach dem Betonieren wurde der Schlauch gezogen. Nach einer Feuchtelagerung von 28 Tagen wurden die Dehnkörper mit einer schnell härtenden Gummimasse luftdicht versiegelt. An die Druckventile wurden Nylonschläuche angeschlossen, von denen der untere Schlauch mit einem Behälter mit Kunstharz und der obere Schlauch mit einer Vakuumpumpe verbunden war. Nach Aufbringen einer vorgegebenen Last $\hat{=} \sigma_s = 624 \text{ N/mm}^2$ (die Streckgrenze des Stahles lag bei $\beta_{0,2} = 659 \text{ N/mm}^2$) wurde ein Vakuum erzeugt und die Luft aus den Poren und den durch die Belastung entstandenen Rissen abgesaugt. Nach 5 bis 10 Minuten wurde durch Öffnen des Ventils B das Harz in den Versuchskörper injiziert. Bei Austritt des Harzes am oberen Schlauchende wurde das Ventil A geschlossen. Um ein Eindringen des Harzes in die feinsten Risse zu erreichen, wurde für die Dauer von 10 Minuten über Preßluft ein Druck von max. 7 bar aufgebracht. Der Versuchsaufbau ist in Bild 2.2 dargestellt.

Nach einer Aushärtezeit des Harzes von 6 bis 8 Stunden wurden die Probekörper entlastet und aufgesägt.

In Bild 2.3 ist ein Dehnkörper abgebildet; die Breite der inneren Risse ist angegeben. Aus den Versuchsergebnissen kann geschlossen werden, daß außen nicht sichtbare Risse in Stabnähe am breitesten sind, während durchgehende Risse ihre größte Breite an der Prüfkörperoberfläche erreichen. Broms gelang es, mit seiner Methode Risse bis zu einer Breite von 0,02 mm sichtbar zu machen.

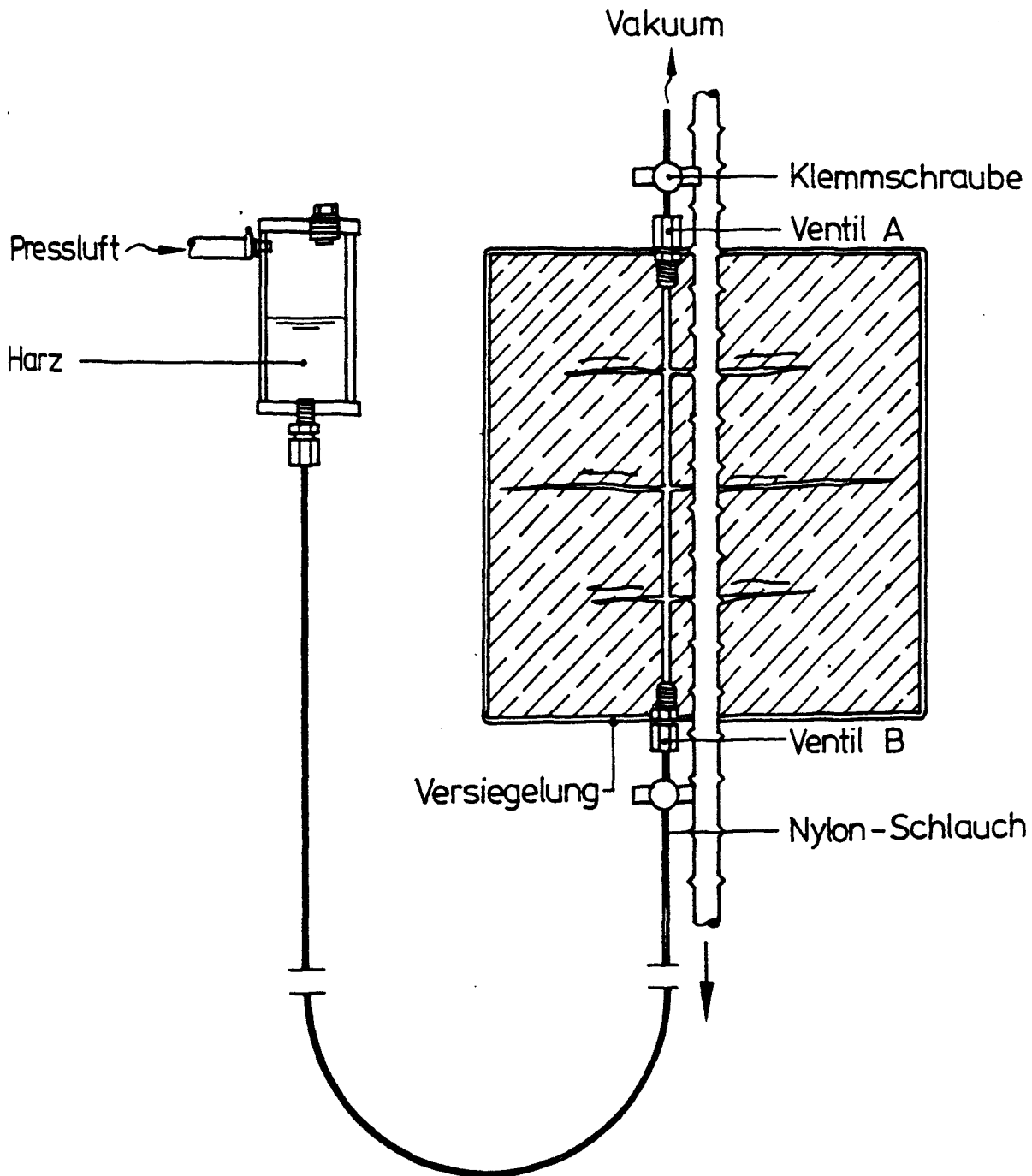


Bild 2.2 Versuchsaufbau zum Injizieren von inneren Rissen nach Broms /2/

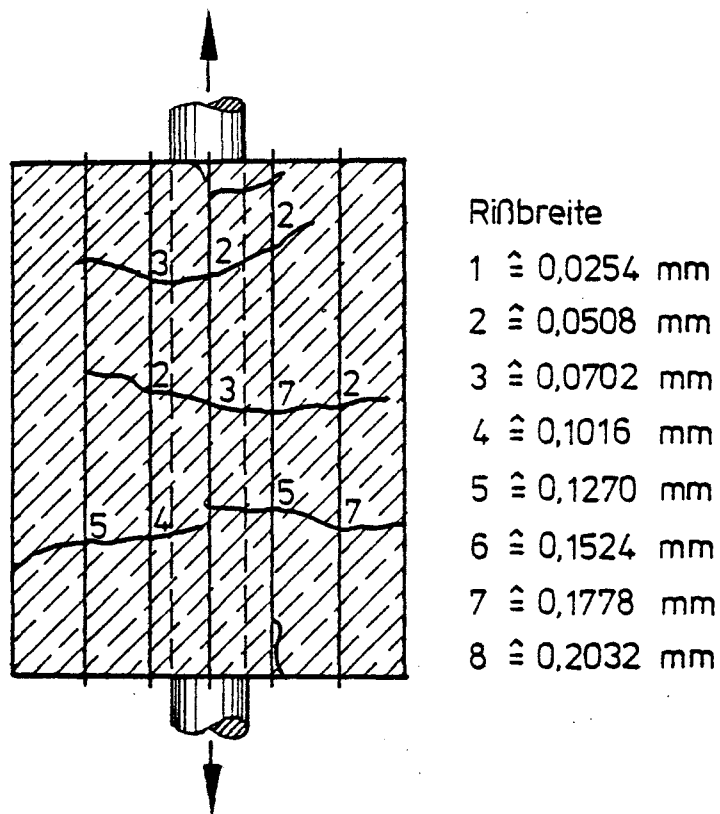


Bild 2.3 Aufgeschnittener Dehnkörper und Angabe der gemessenen Rißbreiten nach Broms /2/

2.2 Versuche von Goto

Goto /3/ untersuchte die innere Rißbildung an prismatischen Dehnkörpern ($L = 1$ m), die zentrisch mit einem Stahlstab $d_s = 19$ mm bzw. $d_s = 32$ mm bewehrt waren. Die Betondruck- bzw. Betonzugfestigkeit betrug $\beta_c = 30$ N/mm² bzw. $\beta_{sz} = 2,8$ N/mm². Zur gezielten Erzeugung von Primärrissen waren die Dehnkörper in Abständen von etwa 22 bis 28 cm vorgekerbt. Bei Erreichen vorgegebener Stahlzugkräfte injizierte Goto über zwei parallel zum Bewehrungsstab verlaufende Kanäle rote Tinte in den Versuchskörper. Der Versuchsaufbau ist in Bild 2.4 dargestellt. Nähere Angaben über die Versuchsmethode sind dem Bericht von Goto nicht zu entnehmen.

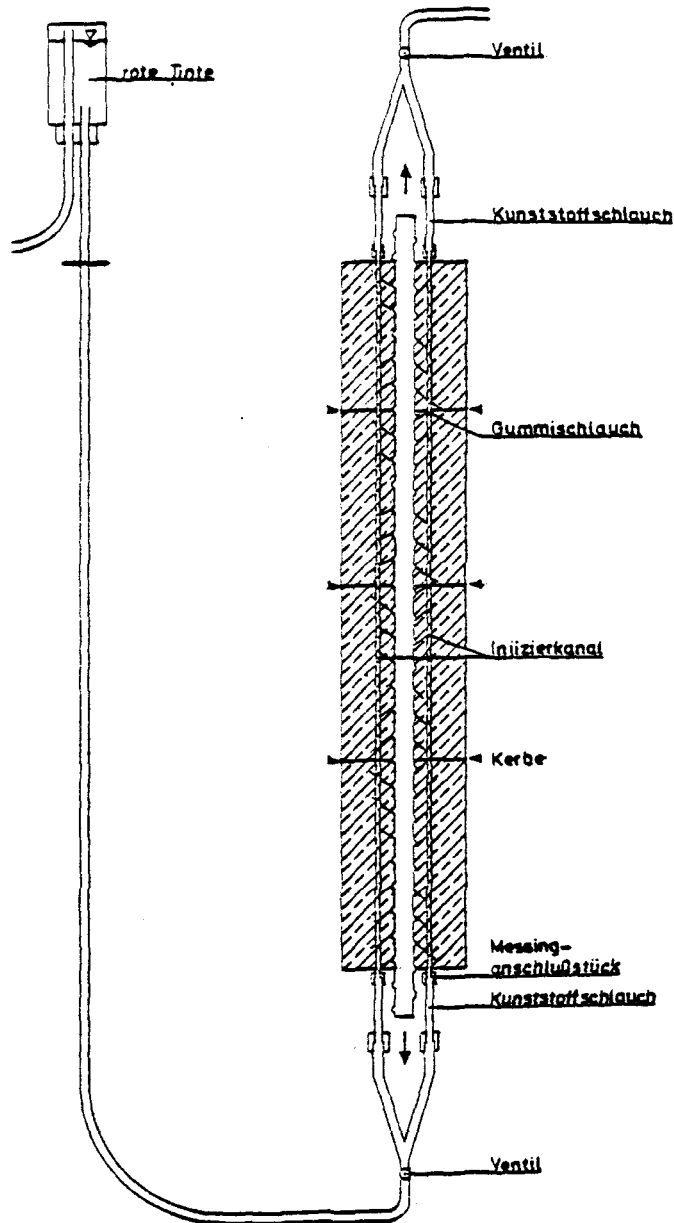


Bild 2.4 Versuchsaufbau zum Injizieren der Verbundrisse nach Goto /3/

Das Aufspalten der Probekörper nach dem Entlasten zeigte, daß sich nach dem Auftreten der Primärrisse PR an jeder Querrippe des Stabes Verbundrisse ausbilden, die zwischen 45° und 80° gegen die Stablängsachse geneigt sind. Die inneren Risse sind stets auf die Primärrisse hingeneigt, d.h. am Verschiebungsnullpunkt zwischen zwei PR ändern sie ihre Neigung. Die Verbundrisse an den zum Primärriß benachbarten Rippen bilden sich bald nach der Primärrißbildung, also unter Stahlspannungen, die der Erstrißstahlspannung entsprechen. Mit steigender Belastung nimmt die Anzahl und Tiefe der Verbundrisse zu. In Bild 2.5 ist die innere Rißbildung schematisch dargestellt.

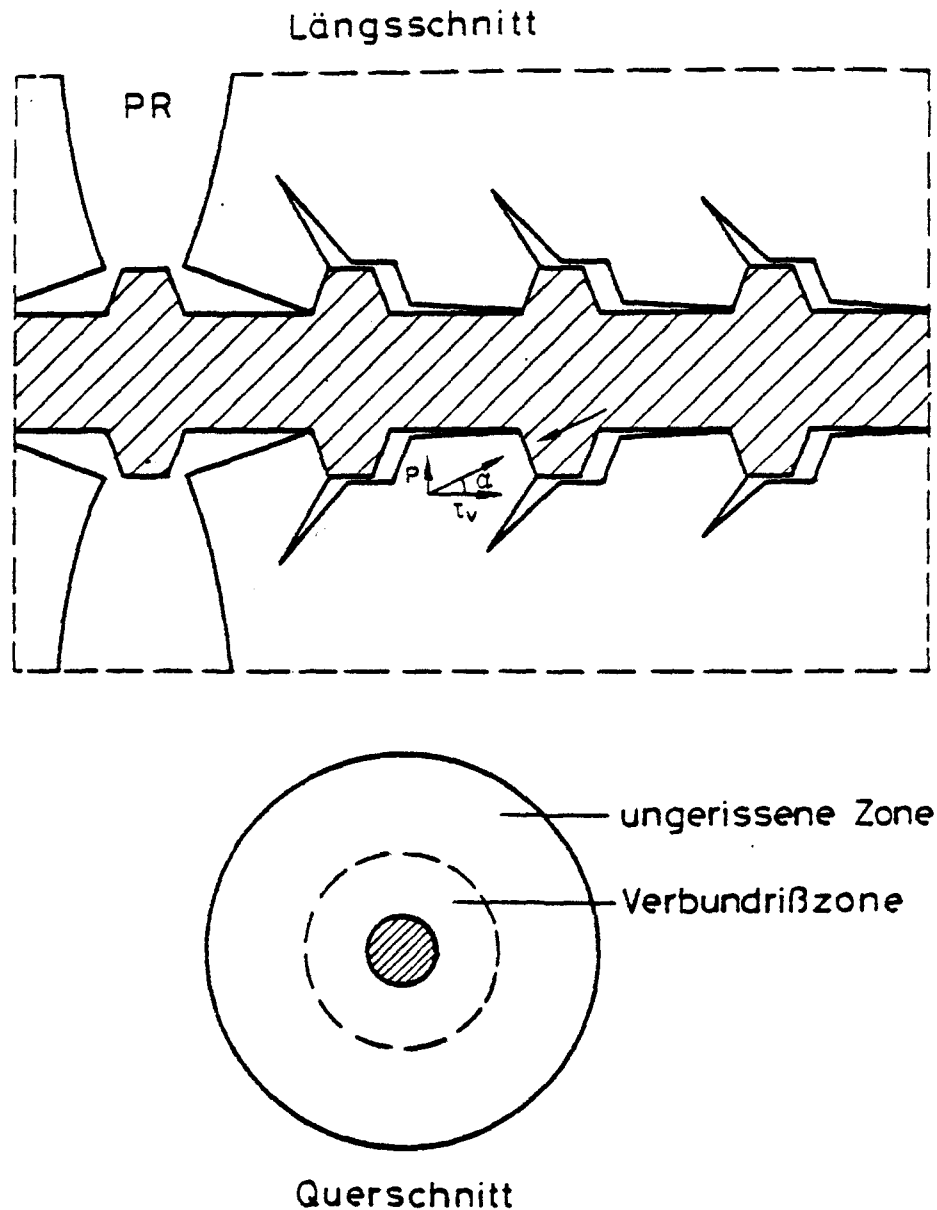


Bild 2.5 Schematische Darstellung der inneren Rißbildung nach Goto /3/

Aus Bild 2.5 geht auch die mit der Rißbildung verbundene Ablösung des Betons von der Staboberfläche hervor, die Goto durch Verfärbung des Betons bzw. des Stahlstabes, insbesondere im Bereich der Primärrisse, nachweisen konnte. In den gefärbten Zonen ist der Haftverbund zerstört, der Scher- und der Reibungsverbund sind jedoch noch wirksam. Goto bezeichnet das entstandene Rißbild als ein kammartiges Traggebilde, dessen Kammzähne durch die von den Rippen in den Beton eingeleiteten Druckkräfte verformt werden. Durch die Verformungen der Betonzähne ist die Breite der Primärrisse in Stabnähe geringer als an der Versuchskörperoberfläche. Aus der Neigung

der Verbundrisse kann man ableiten, daß die Druckkräfte unter dem Winkel α von den Rippen in den Beton hineinstrahlen. Die zur Stabachse radiale Komponente dieser Rippendruckkraft wirkt auf den Beton der inneren Rißzone ähnlich wie ein hydrostatischer Rohrrinnen-
druck. Damit entstehen in der äußeren ungerissenen Zone tangential gerichtete Zugspannungen, die die Bildung von Längsrissen hervorrufen können. Goto konnte die Längsrißbildung an drei bewehrten Dehnkörpern nachweisen, deren Längen dem größten, mittleren sowie dem kleinsten Rißabstand entsprachen. Nach seinen Beobachtungen bilden sich die Sprengrisse in der Nähe der Staboberfläche und wachsen mit steigender Belastung nach außen. Goto stellte weiterhin fest, daß die innere Rißbildung von der geometrischen Ausbildung der Querrippen erheblich beeinflußt wird. Stahl mit zur Stabachse um 90° geneigten Querrippen zeigte ein wesentlich ausgeprägteres Rißbild als Stahl mit wellenförmigen Querrippen.

2.3 Versuche von Illston und Stevens

Illston und Stevens /4/, /5/ prüften Balken und zylindrische Dehnkörper, die mit glatten Stahlstäben bzw. mit Betonrippenstäben bewehrt waren. Die Rißbildung wurde in Anlehnung an die Versuchsmethode von Broms untersucht. Das Kunstharz wurde bei Stahlspannungen zwischen $\sigma_s = 180$ und 320 N/mm^2 über Verpreßöffnungen mit geringem Druck in den Versuchskörper gepreßt. Mit der Versuchstechnik war es nach Angaben von Illston und Stevens möglich, durchgehende Risse mit einer Breite $w \geq 0,01 \text{ mm}$ auszupressen und Ablösungen des Betons im Rißbereich sichtbar zu machen. Von jeder Rippe des Stahlstabes ausgehende innere Risse sowie Längsrisse konnten nicht festgestellt werden. Die Autoren räumen jedoch ein, daß diese Mikrorisse so fein sein könnten, daß sie mit Kunstharz nicht verpreßbar sind. Aufgrund ihrer Versuchsergebnisse entwickelten Illston und Stevens folgende Rißtheorie:

Die ersten inneren Verbundrisse bilden sich in Stabnähe in Bereichen hoher Verbundbeanspruchung. Dabei geht der Haftverbund verlo-

ren, Reibungs- und Scherverbund bleiben jedoch wirksam. In diesem Stadium entstehen auch Mikrorisse in der Haftzone Zuschlagkorn Zementsteinmatrix. Der erste durchgehende Riß bildet sich, indem sich die entstandenen Mikrorisse miteinander verbinden, dabei entstehen in Stabnähe und an der Versuchskörperoberfläche Rißverzweigungen. Die Breite der durchgehenden Risse war an der Oberfläche größer als in Stabnähe. Diese Beobachtungen stimmen mit den Rißbreitenmessungen von Broms /2/ u.a. überein.

2.4 Versuche von Trost, Cordes, Thormählen und Hagen

Im Rahmen von Verbunduntersuchungen an Spannstählen und -gliedern wurde von Trost et al /6/ die innere Rißbildung an Auszieh- und Dehnkörpern studiert. Ziel dieser Versuche war es, den Mechanismus der Verbundkraftübertragung von Spanngliedern in Hüllrohren zu untersuchen.

Zur Feststellung der inneren Rißbildung wurde durch innerhalb sowie außerhalb der gewellten Hüllrohre parallel zum Spannglied verlaufende Kanäle die Indikatorlösung Phenolphthalein injiziert. Die Kanäle zum Einbringen des Injektionsgutes wurden durch in leicht gespanntem Zustand einbetonierte PVC-Schläuche mit einem Außendurchmesser von 3 mm hergestellt, die an den Versuchskörperenden zur Betonieroberseite herausgeführt wurden. Diese Umlenkung erfolgte mit Hilfe eines PE-Schlauches (Innendurchmesser 4 mm), an den zum Injizieren auch die Zulaufschläuche angeschlossen wurden.

Vor dem Injizieren wurde zur Abdichtung der Zugkörper eine Folie auf den Beton aufgeschrumpft und durch Hartfaserplatten vor dem Ausbeulen geschützt. Beim Injiziervorgang konnte das Aufsteigen der Indikatorflüssigkeit an den Schmalseiten der Körper gut beobachtet werden.

Beim Injizieren wurde von einem Versuchskörperende die Indikatorlösung so lange in den Körper eingeleitet, bis am Gegenende der bla-

senfreie Austritt feststellbar war. Die Injizierflüssigkeit wirkte anschließend für die Dauer von 2 Stunden mit geringem Druck ($\sim 0,5$ m Flüssigkeitssäule) auf den Versuchskörper ein. Nach Beendigung der Auszieh- bzw. Zugversuche wurden die Versuchskörper in Höhe der Spanngliedlagen aufgeschnitten. Nach dem Abwickeln der Hüllrohre war die innere Rißbildung im Einpreßmörtel gut sichtbar, außerhalb der Hüllrohre konnten innere Risse nicht eindeutig nachgewiesen werden. Diese Tatsache führen die Autoren darauf zurück, daß die Rißbreiten so klein sind, daß die Risse in einem Beton mit normalem Kornaufbau auch nach Einfärbung kaum feststellbar sind.

Der durch die zuvor beschriebenen Versuche festgestellte Prozeß der inneren Rißbildung bestätigt i.w. Gotos /3/ Beobachtungen. Die inneren Risse im Zementstein des EP-Mörtels gehen über die gesamte Spanngliedlänge. In unmittelbarer Nähe der Primärrisse erfolgt eine engere Rißbildung als im Bereich zwischen den Primärrissen. Der mittlere Rißabstand liegt bei allen Spanngliedern unabhängig von der bezogenen Rippenfläche und der Ausbildung der Spannglieder bei etwa $a_m = 20$ bis 25 mm. Die inneren Risse sind bezogen auf die Spannsteelachse in Richtung auf die Primärrisse in einem mittleren Winkel von etwa 70° bis 75° geneigt. Der Verbundspannungsnullpunkt zwischen zwei Primärrissen ist durch eine Änderung der Neigungsrichtung erkennbar. Aus inneren Rissen können sich mit zunehmender Belastung äußere, sogenannte Sekundärrisse entwickeln. Diese Aussage wird durch die zeitliche Abfolge der Entstehung der äußeren Risse bestätigt. Die Entwicklung von Sekundärrissen beeinflusst das bei der Primärrißbildung entstandene innere Rißbild nicht bzw. nur örtlich.

Aus den zuvor geschilderten Beobachtungen entwickelten Trost et al ein Modell, das die Verbundkraftübertragung vom Spannsteel auf den umgebenden Einpreßmörtel für den Fall Vorspannung mit nachträglichem Verbund beschreibt. Der Verbundmechanismus bei Spanngliedern mit nachträglichem Verbund und bei unmittelbar eingebetteten Betonstählen ist im Prinzip vergleichbar.

Bei Betonstählen werden die Verbundkräfte über die durch die innere Rißbildung entstandenen Betonzähne übertragen. Bei Spannstählen werden die "Zähne" durch die Hüllrohrwandung begrenzt, innerhalb des Einpreßmörtels entsteht ein pendelstützartiges System von Druckstreben. Die Kraftübertragung von Betonstahl bzw. Spannstahl auf den umgebenden Beton bzw. Einpreßmörtel nach erfolgter innerer Rißbildung ist in Bild 2.6 schematisch dargestellt.

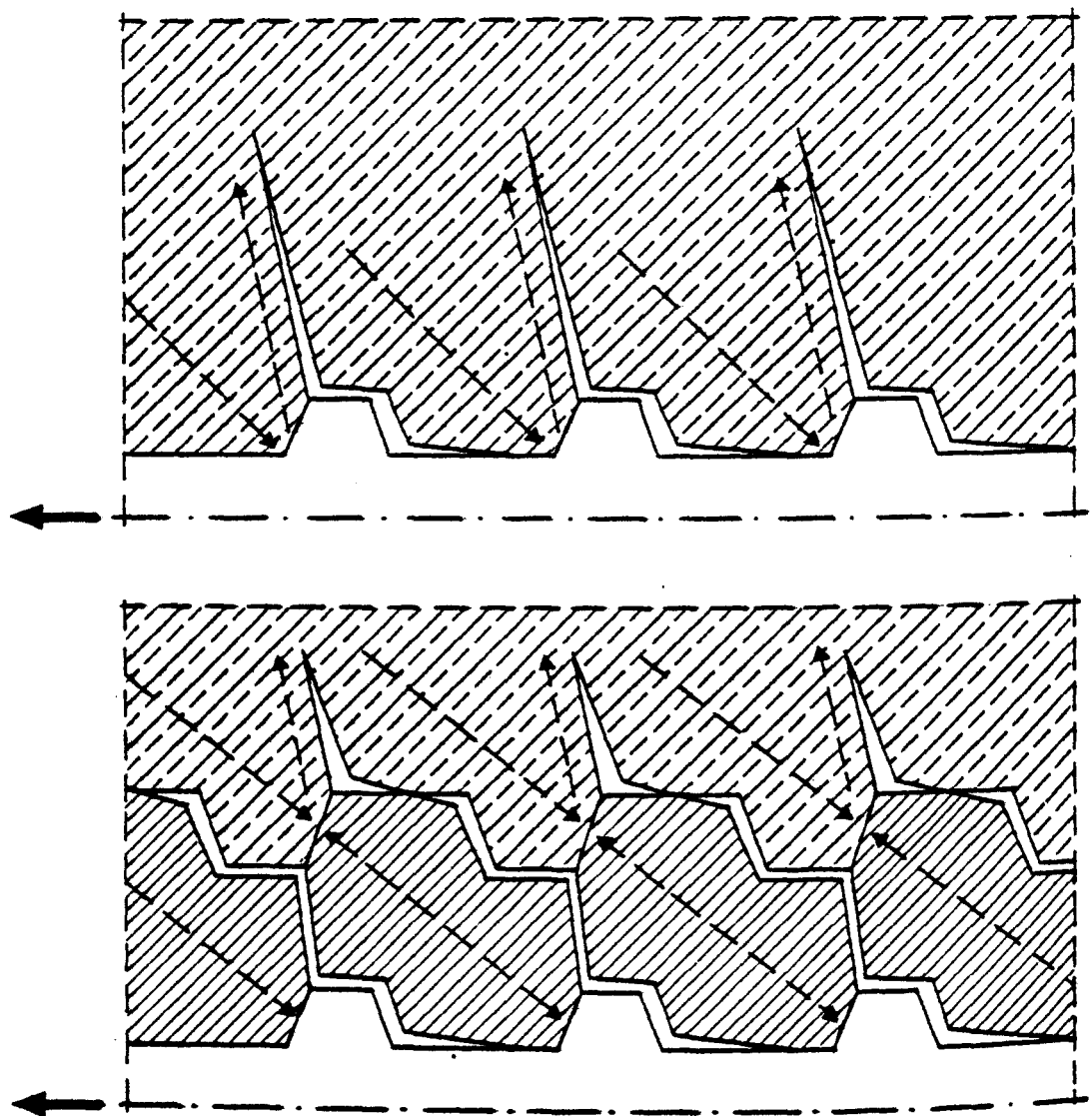


Bild 2.6 Prinzipielle Darstellung der inneren Rißbildung und der Kraftübertragung vom Stahl auf den umgebenden Beton für
a) Stähle mit unmittelbarem Verbund und
b) Stähle mit nachträglichem Verbund nach Trost et al /6/

2.5 Versuche von Kupfer, Janovic und Müller

Kupfer, Janovic und Müller /7/ untersuchten zentrisch mit einem Spanngliedstab bewehrte Dehnkörper ($L = 1,60 \text{ m}$), die in Abständen vorgekerbt waren. Ziel der Versuche war, quantitative Aussagen über die Abnahme der Rißbreite von der Betonoberfläche bis zum Hüllrohr bzw. bis zum Spannstahl zu gewinnen. Um die im belasteten Zustand vorhandenen Rißbreiten festzuhalten, wurden zum einen die durch Einkerbungen vorgegebenen Risse von außen, zum anderen zwei im Einpreßmörtel parallel zum Spannglied verlaufende Kanäle, die durch Herausziehen einbetonierter Stahldrähte erzeugt wurden, mit Kunstharz injiziert. Nähere Angaben über den Injiziervorgang sind dem Bericht nicht zu entnehmen. Bei den Versuchen gelang es, die Trennrisse zu verpressen und nach dem Aushärten des Kunstharzes und dem Aufschneiden der Versuchskörper die Rißbreiten zu messen. Im Einpreßmörtel wurden nur in der nahen Umgebung der Primärrisse Haarrisse festgestellt und deren Rißbreite gemessen.

2.6 Versuche von Oostveen sowie Hungspreug

In der Arbeit von Vos /8/ wird über Verbundrißuntersuchungen von Oostveen und Hungspreug berichtet. Oostveen wählte eine mit den Versuchen von Goto /3/ vergleichbare Untersuchungsmethode. Er konnte von den Rippen des Stahlstabes ausgehende Verbundrisse nachweisen, deren Länge etwa $1,5 d_s$ betrug. Die Neigung der Verbundrisse zur Stablängsachse stieg mit zunehmendem Abstand vom Primärriß von 45° auf 85° an. Die von Goto beobachtete Längsrißbildung wurde von Oostveen ebenfalls festgestellt.

Hungspreug studierte die Verbundrißbildung an Ausziehkörpern mit kurzer Einbettungslänge ($l_v = 3$ eingebettete Rippen). Er beobachtete an jeder Rippe einen Verbundriß mit einer Länge von etwa $12 \text{ mm} \approx 0,5 d_s$. Die Risse waren in Richtung des belasteten Stabendes geneigt. Der Winkel zur Stabachse betrug anfangs 70° , in einem Abstand von 12 mm vom Stahlstab waren die Risse normal zur Stabachse gerichtet. Beim Versagen des Versuchskörpers schlugen die inneren Risse bis zur Versuchskörperoberfläche durch.

3. EIGENE VERSUCHE

Ansatzpunkt für die Entwicklung einer Methode zur Sichtbarmachung der inneren Rißbildung war die bei Sanierungsmaßnahmen angewandte Technik der Rißverpressung mit Kunstharzsystemen.

Erster Arbeitsvorgang ist dabei das Setzen der Verpreßöffnungen (Packer) und das Verdämmen der Risse. Das Verpressen kann über in der Dämmasse befestigte Klebepacker oder über Bohrpacker erfolgen, die in den Riß kreuzende Bohrlöcher eingesetzt werden. Bohrpacker erlauben i.d.R. einen höheren Verpreßdruck als Klebepacker. Da bei diesen Versuchen nur mit relativ geringem Verpreßdruck gearbeitet werden sollte und beim Bohren Beschädigungen des Verbundes zu befürchten waren, wurden hier Klebepacker verwendet. Bei der Wahl der Dämmasse, des Kunstharzsystems und der Verpreßgeräte wurde auf am Institut bekannte und bewährte Materialien bzw. Geräte zurückgegriffen.

3.1 Versuchskörper

Die Verpreßversuche erfolgten sowohl an Dehnkörpern als auch an Ausziehkörpern. In Anlage 1 ist ein Überblick über die untersuchten Dehnkörper gegeben.

Zusammen mit dem Versuchskörper DK1 wurde ein zentrischer Ausziehkörper AK1 mit den Abmessungen: \varnothing 280 mm, $h = 280$ mm, $l_v = 5 d_s = 140$ mm hergestellt. Der Stahlstab BSt III U, $f_R = 0,074$, $d_s = 28$ mm, war mit einer beidseitigen Längsnut versehen, in die DMS eingeklebt waren. Desweiteren wurde eine Serie exzentrischer Ausziehkörper aus Mörtel mit der Bezeichnung AKE5 betonierte. Die Abmessungen dieser Versuchskörper sind in Anlage 2 gegeben.

Alle Versuchskörper wurden stehend betonierte. Zur Herstellung der Injektionskanäle wurde Elektrokabel $\varnothing = 3$ mm mit innenliegendem Stahlkern in leicht gespanntem Zustand parallel zum Stahlstab ein-

betoniert. Das Elektrokabel ließ sich, ebenso wie später ausprobierter PVC-Schlauch und eingefetteter, dünner Spannstahl, nach dem Ansteifen des Betons (etwa 6 Std. nach dem Betonieren) i.d.R. problemlos ziehen.

Bei den Ausziehkörpern der Serie AKE5 wurde der Injektionskanal innerhalb der verbundfreien Vorlänge seitlich aus dem Versuchskörper geführt. Die notwendige Umleitung erfolgte durch einbetonierte Stahlhülsen, in die sowohl von oben als auch von der Seite ein Schweißdraht geführt wurde. Beim Ziehen der Drähte bestand die Gefahr, daß durch hereinfallendes Korn bzw. kleine Betonbrocken der Kanal verstopfte. Das Überprüfen der Durchgängigkeit des Kanals mit Druckluft zeigte, daß ein Großteil der Versuchskörper nicht zu verwenden war.

3.2 Versuchsmaterial

3.2.1 Bewehrungsstahl

Die Versuche wurden vorwiegend mit Betonrippenstahl BSt 420/500 RU, Stabdurchmesser $d_s = 16$ mm sowie $d_s = 28$ mm, durchgeführt. Da Goto bei Querrippenstählen ein ausgeprägteres Ribbild feststellte, wurde auch schwedischer Stahl KS 60, $d_s = 20$ mm, verwendet. Die Festigkeits- und Profilierungskennwerte sind in Tabelle 3.1 zusammengestellt.

Tabelle 3.1: Bezogene Rippenfläche und Festigkeitskennwerte der verwendeten Bewehrungsstähle

Stahlsorte	d_s mm	f_R -	$\beta_s; \beta_{0,2}$ N/mm ²	β_Z N/mm ²
BSt III U	28	0,074	459	638
BSt III U	16	0,072	492	692
KS 60	20	0,130	618	757

3.2.2 Beton, Mörtel

Da die Erfahrungen von Trost et al /6/ gezeigt hatten, daß eine Sichtbarmachung der inneren Rißbildung nur bei Feinkornbeton möglich war, wurde für die Versuche Normalbeton mit feinstoffreicher Kornzusammensetzung (Sieblinie C 16 nach DIN 1045) sowie Mörtel (Korngröße 0 - 2 mm) verwendet. Zur Beton- bzw. Mörtelherstellung wurde Portlandzement PZ 35 F gewählt. Die Zusammensetzung der verwendeten Betone und Mörtel ist in Anlage 3 gegeben.

Die Versuchskörper wurden nach dem Betonieren 7 Tage unter feuchten Tüchern und anschließend bis zur Prüfung bei 20 °C und 65 % r.F. gelagert. In der gleichen Weise wurden auch die Begleitkörper (15 cm bzw. 20 cm Würfel sowie Zylinder d = 15 cm, h = 30 cm) gelagert. An diesen Probekörpern wurde nach 28 Tagen bzw. zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung die Betondruck- und Spaltzugfestigkeit bestimmt. Die Festigkeitskennwerte sind in Anlage 4 zusammengestellt.

3.2.3 Abdichtung, Injektionsgut

Zum Verschließen der Oberflächenrisse bei den Dehnkörpern bzw. zum Abdichten der verbundfreien Vor- und Nachlängen bei den Ausziehkörpern wurde nach einer gründlichen Säuberung der Oberflächen der gesamte Versuchskörper - mit Ausnahme der Körper DK1 und AK1 - mit einer Verbundmasse (Handelsbezeichnung: Icosit Kunststoff 366, Hersteller: Lechler Chemie) eingespachtelt. Bei den Versuchen mit hohem Verpreßdruck wurde diese Versiegelung mit Glasfasermatten verstärkt. Diese Abdichtung erwies sich grundsätzlich als geeignet. Dennoch waren auch bei sorgfältiger Verarbeitung bei einigen Versuchen Risse bzw. Ablösungen der Hülle vom Beton - insbesondere an den Außenrändern der Injektionspacker - zu verzeichnen. Nachteil dieser Abdichtungsmethode ist, daß das äußere Rißbild nicht mehr sichtbar ist. Als Verpreßmaterial wurde bei den ersten Versuchen ein schnellhärtendes Epoxidharz mit Amin-Härter (Handelsbezeichnung: Concretin IHS, Hersteller: Concrete Chemie) eingesetzt. Di

Viskosität des Harzes bei 20 °C/4 mm DIN Becher beträgt 40 sec, die Topfzeit liegt bei etwa 30 Minuten. Um eine deutliche Abzeichnung der Risse für fotografische Aufnahmen zu erzielen, wurde das Harz mit einem Farbpulver versetzt.

Bei den letzten Versuchen wurde als Verpreßgut das Epoxidharz Araldit XW 396 mit Härter der Herstellerfirma Ciba-Geigy eingesetzt. Das Verpreßgut wurde mit einem flüssigen Färbemittel versetzt.

3.3 Versuchsdurchführung

Bei den Dehnkörpern wurde die Belastung stufenweise bis zur Höchstlast aufgebracht. Bei den Körpern DK4 und DK5 erfolgten nach Erreichen der Höchstlast F_{max} . 10 bzw. 9500 Lastwechsel zwischen $F_{unten} = 20$ kN und F_{max} . Der Dehnkörper DK 7 wurde 100mal zwischen $F_{unten} = 80$ kN und $F_{oben} = 100$ kN beansprucht. Die Mörtelkörper MK1 und MK2 wurden 100 Lastwechsel zwischen einer geringen Unterlast von etwa 1 kN und einer Oberlast von 36 kN unterworfen.

Bei den Ausziehkörpern wurden von jeder Serie zunächst 3 Kurzzeitversuche durchgeführt. Die Höhe der Beanspruchung für die Verpreßversuche wurde zu 70 % der mittleren Verbundfestigkeit festgelegt. Die Entwicklung der Verschiebung am unbelasteten Stabende wurde während des Belastungsvorganges sowie während der Standzeit mit induktiven Wegaufnehmern gemessen und mit einem x-y-t-Schreiber aufgezeichnet.

Nach dem Aufbringen der Lastwechsel bzw. dem Erreichen der Höchstlast wurde die Betonoberfläche gesäubert und auf jeden äußeren Riß sowie auf die Eintritt- und Austrittöffnungen der Injektionskanäle ein Packer aufgeklebt. Da die Injektionskanäle eng am Stahlstab angeordnet waren, mußte die Klebefläche der Packer teilweise abgeschnitten werden. Dadurch war die Gefahr, daß sich die Klebepacker unter dem Druck des Injektionsgutes vom Beton lösten, hier beson-

ders groß. Anschließend wurde die Körperoberfläche mit der Verbundmasse eingespachtelt, die nach etwa 24 Stunden erhärtet war. Die senkrecht in der Prüfmaschine eingebauten Dehnkörper wurden durch die untere Eintrittöffnung des Verpreßkanals mit Kunstharz injiziert. Die auf den Rissen sitzenden Klebepacker wurden sukzessive von unten nach oben nach dem Austritt von Kunstharz mit einem Nippel verschlossen. Dadurch war gewährleistet, daß die Luft aus dem Injektionskanal sowie den Trennrissen entweichen konnte. Während der Topfzeit des Harzes wurde mehrmals nachgepreßt.

Da bei den Ausziehkörpern keine äußerlich sichtbaren Risse auftreten, wurden diese Versuchskörper bereits vor dem Einbau in die Prüfmaschine mit dem Abdeckmaterial versehen.

Die Injizierung des Kunstharzes erfolgte bei den ersten Körpern mit einer Labor-Schlauchpumpe (Handelsbezeichnung: Magna Z, Herstellerfirma: Multifix), die einen max. Druck von etwa 3 bar aufbauen kann. Um mit einem höheren Druck verpressen zu können, wurde bei den letzten Versuchen eine Niederdruck-Injektionspumpe der Firma Polyplan verwendet, mit der ein Injektionsdruck zwischen 0 und 60 bar aufgebracht werden kann. Beim Einsatz dieser Pumpe traten große Schwierigkeiten auf. Gearbeitet wurde mit den beiden Pumpen, da diese im Institut vorhanden waren und mit ihnen bis dahin bei Verpreßversuchen an Balken befriedigende Ergebnisse erzielt worden waren.

Nach dem Erhärten des Kunstharzes, nach etwa 1 - 3 Tagen, wurden die Versuchskörper entlastet und ausgebaut. Die Dehnkörper wurden in Längsrichtung aufgeschnitten und anschließend in Querrichtung derart aufgesägt, daß sich die Trennrisse etwa in der Mitte der so gewonnenen Betonabschnitte befanden.

Bei den Ausziehkörpern der Serie AKE5 wurde der Verbundbereich herausgeschnitten und in einen Kunstharzblock eingegossen. In einer wassergekühlten Schleifmaschine wurde der Körper dann bei einem

Vorschub der Scheibe von 0,1 mm pro Schleifdurchlauf bis etwa zum Viertelpunkt der Schrägrippen des Stabes heruntergeschliffen (siehe Bild 3.1).

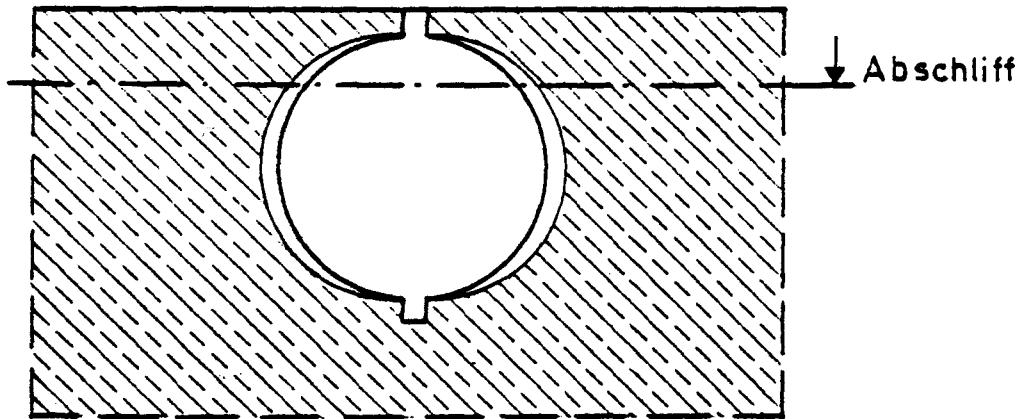


Bild 3.1 Abschleif des in einen Kunstharzblock eingegossenen Verbundbereichs bei den Ausziehkörpern AKE5.8 und AKE5.9

4. VERSUCHSERGEBNISSE

Das Ziel der hier beschriebenen Versuche war es, eine Methode zur Sichtbarmachung der inneren Rißbildung über mit Kunstharz injizierte parallel zum Stahlstab verlaufende Injektionskanäle zu finden. Eine Darstellung der inneren Verbundrisse, wie sie z.B. von Goto für Betonstahl sowie Trost et al /6/ für Spannstahl gefunden wurde, gelang bei diesen Versuchen nicht. Dennoch soll hier getrennt für jeden einzelnen Dehnkörper sowie für die Ausziehkörper das nach dem Aufschneiden der Versuchskörper gefundene Rißbild durch Fotos und Skizzen dokumentiert werden.

Dehnkörper_DK1

Der Dehnkörper DK 1 war zur gezielten Rißbildung in Probenmitte mit einer ringsumlaufenden Nut versehen. Um eine weitere Querrißbildung zu vermeiden, wurde der Durchmesser des Versuchskörpers in Anlehnung an übliche Abmessungen von Ausziehkörpern zu $D = 10 \text{ d}_s = 280 \text{ mm}$ gewählt. Zur Ermittlung der Verbundspannungsverteilung war der Stahlstab im mittleren Drittel der Versuchskörperlänge mit DMS besetzt. Um die Verbundeigenschaften des Stabes möglichst wenig zu verändern, wurde im Bereich der Längsrippen beidseitig eine Nut mit den Abmessungen $b/t = 5/5 \text{ mm}$ gefräst. In diese Nut wurden DMS der Firma Hottinger, Typ 3/120 LY51 geklebt. Die Kabel verliefen von der Stabmitte aus in der Nut und wurden jeweils am Ende der Nutlänge in einem Plastikrohr aus dem Versuchskörper geführt. Die Anordnung der DMS geht aus Anlage 5 hervor.

Vor dem Betonieren wurden die DMS geeicht. Die Eichkurven der gegenüberliegenden DMS Nr. 7 und Nr. 25 sind beispielhaft in Anlage 6 gezeigt.

Der Dehnkörper wurde in Stufen belastet, dabei wurde nach jeder Lasterhöhung wieder auf eine geringe Vorlast entlastet. Zusätzlich zu den DMS-Messungen wurde bei jeder Laststufe die Breite des wie

erwartet in Versuchskörpermitte aufgetretenen Risses an zwei Seiten über induktive Wegaufnehmer gemessen. Nach dem Erreichen der Höchstlast $F_{\max.} = 190 \text{ kN}$ wurde der Riß abgedichtet. Anschließend wurde der Riß über den parallel zum Stahlstab verlaufenden Injektionskanal mit Kunstharz verpreßt. Anlage 7 zeigt den Versuchskörper in der Prüfmaschine sowie den aufgeschnittenen Dehnkörper nach Versuchsende.

Aus den im Versuch gemessenen Stahldehnungen wird über die Eichkurve einer Meßstelle auf die Kraft F im Stahl an dieser Stelle geschlossen. Die Ableitung der Stahlkraftverteilung über die Meßlänge stellt die Verbundspannung $\tau_v(x)$ dar:

$$\tau_v(x) = \frac{\Delta F(x)}{\Delta x \cdot u_s} \quad (4.1)$$

Δx Abstand zwischen zwei Meßstellen

ΔF Kraftdifferenz im Stahlstab über die Länge Δx

u_s Stabumfang

In den Anlagen 8 und 9 ist der Stahldehnungsverlauf sowie der Verbundspannungsverlauf über die Meßlänge für ausgewählte Laststufen dargestellt. Bei der Angabe der Stahlspannung im Riß σ_R wurde der um den Nutquerschnitt verminderte Nennquerschnitt angesetzt. Beim Versuch zeigte sich, daß kein DMS ausgefallen war. Bei der Auftragung der Stahldehnungen bzw. Verbundspannungen wurden die Meßwerte gegenüberliegender DMS gemittelt.

Ausziehkörper AK1

Zusammen mit dem Dehnkörper DK1 wurde der Ausziehkörper AK1 betoniert. Der Stahlstab war über die Verbundlänge $l_v = 5 d_s = 140 \text{ mm}$ mit DMS besetzt; deren Anordnung geht aus Anlage 10 hervor. Der Injektionskanal wurde drucklos mit Phenolphthalein gefüllt, das einige Stunden einwirkte. Nach dem Aufschneiden des Versuchskörpers

zeigte sich, daß nur im Kanal eine Rotverfärbung erfolgt war. Der aufgeschnittene Ausziehkörper ist in Anlage 11 abgebildet.

In den Anlagen 12 und 13 ist der Stahldehnungsverlauf sowie die nach Gleichung 4.1 ermittelte Verbundspannungsverteilung über die Verbundlänge für ausgewählte Laststufen dargestellt. Beim Eichen stellte sich heraus, daß der Meßstreifen Nr. 12 ausgefallen war. Bei der Auftragung der Stahldehnungen in Anlage 12 konnten daher nur die Meßwerte des DMS 6 berücksichtigt werden.

Dehnkörper DK2 bis DK7 sowie MK1 und MK2

Die Eichung des im ersten Versuch verwendeten Meßstabes nach Versuchsende ergab, daß eine Reihe von DMS insbesondere in Rißnähe ausgefallen war. Es wird vermutet, daß dieser Ausfall auf das Eindringen von Kunstharz in die Nut zurückzuführen ist. Aus diesem Grund wurde auf eine Wiederverwendung des Stabes bei den nachfolgenden Versuchen verzichtet. Primäres Ziel der weiteren Dehnkörperversuche war es daher, die Verpreßtechnik weiterzuentwickeln.

Als Ergebnis der Verpreßversuche an den Dehnkörpern DK2 bis DK7 sowie an den aus Mörtel hergestellten Dehnkörpern MK1 und MK2 ist in den Anlagen 15 bis 30 die nach dem Aufschneiden der Versuchskörper sichtbare Rißbildung in Skizzen und Fotos dargestellt. In den skizzierten Rißbildern sind die an der Betonoberfläche sowie in unmittelbarer Stabnähe gemessenen Rißbreiten angegeben. Bedingt durch das Aufsetzen der Rißmeßlupe erfolgte die Messung jeweils in einem Abstand von 1 cm vom Stahlstab bzw. von der Betonoberfläche. In Tabelle 4.1 sind die jeweils an einem Dehnkörper gemessenen mittleren Rißbreiten w_m mit der zugehörigen Standardabweichung s angegeben.

Tabelle 4.1: Mittelwert w_m und Standardabweichung s der im Betoninneren gemessenen Rißbreite

Versuchskörper	Abstand vom Stab cm	Rißbreite w_m mm	Standardabweichung s mm	Stahlspannung N/mm ²
DK3	5,0	0,152	0,03	243,6
	1,0	0,125	0,04	
DK4	5,0	0,171	0,077	284,2
	1,0	0,120	0,039	
DK5	5,0	0,201	0,037	243,6
	1,0	0,147	0,039	
DK6	5,0	0,233	0,055	324,8
	1,0	0,193	0,037	
DK7	3,0	0,227	0,089	318,3
	1,0	0,170	0,065	
MK1	3,2	0,240	0,072	248,7
	1,0	0,212	0,089	
MK2	3,2	0,242	0,104	373,0
	1,0	0,216	0,090	

Für den Dehnkörper DK5 ist die Abhängigkeit zwischen der mittleren Rißbreite w_m und dem Abstand x vom Stahlstab in Bild 4.1 dargestellt.

Wie bereits von Watstein und Mathey /9/ sowie Kupfer, Janovic und Müller /7/ u.a. festgestellt, nimmt die Rißbreite von der Betonoberfläche bis zur Stablage geringfügig ab. Ein Vergleich mit in /10/ mitgeteilten Rißbreitenmessungen für vergleichbare Stahlspannungen und Betondeckungen zeigt, daß bei diesen Versuchen die Abnahme der Rißbreite mit wachsendem Abstand von der Betonoberfläche geringer ausfällt.

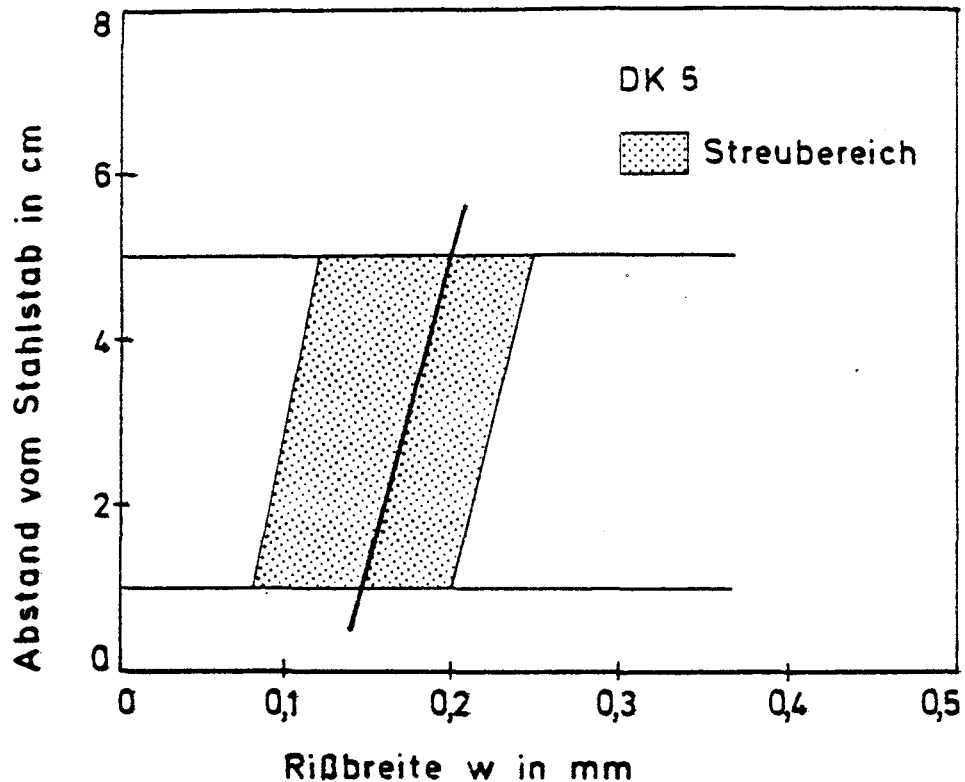


Bild 4.1 Mittlere Rißbreite w_m in Abhängigkeit vom Abstand zum Stahlstab

Nach /7/ kann das Verhältnis von mittlerer Rißbreite im Abstand x vom Stahlstab zu mittlerer Rißbreite am Stab angegeben werden zu:

$$\frac{w_m(x)}{w_m(x=0)} = w = 1 + x^{0,5} \quad (4.2)$$

Für einen Abstand vom Stab von $x = 5$ cm ermittelt man nach Gleichung 4.2 ein Verhältnis der Rißbreiten w von 3,2. Mit den hier im Versuch gemessenen Rißbreiten erhält man z.B. für den Dehnkörper DK5 ein Verhältnis von

$$\frac{w_m(x=5 \text{ cm})}{w_m(x=0)} = 1,5$$

Nach Gleichung 4.2 ergibt sich damit eine wesentlich größere Abnahme der Rißbreiten von der Betonoberfläche zum Stab hin als in den hier beschriebenen Versuchen.

Lutz und Gergely /11/ schließen aufgrund der Mikrorißbildung und der Verformung der "Betonzähne" auf eine in Anlage 14 dargestellte Ablösung des Betons von der Stahloberfläche in Rißnähe. Die Tatsache der Ablösung wurde von Trost et al /6/ durch Farbinjektion für Spannglieder in Hüllrohren experimentell nachgewiesen.

Die Darstellung der inneren Rißbildung für die Dehnkörperversuche in den Anlagen 15 bis 30 zeigt die durch Verfärbung mit Kunstharz sichtbare Ablösung des Betons von der Stahloberfläche. In den verfärbten Bereichen ist der Haftverbund zwar zerstört, der Scherverbund jedoch noch wirksam.

Zu Beginn der Versuche der Serie AKE5 wurden drei der aus Mörtel hergestellten Ausziehkörper im Kurzzeitversuch geprüft. In Tab. 4.2 sind die mit

$$\tau_v = \frac{F}{I_v \cdot u_s} \quad (4.3)$$

berechneten mittleren Verbundbruchspannungen sowie die auf die Würfeldruckfestigkeit bei Versuchsbeginn bezogenen Verbundfestigkeiten $\tau_v/\beta_w(t_0)$ angegeben.

Tabelle 4.2

AKE5	τ_{vu} N/mm ²	$\tau_{vu}/\beta_w(t_0)$ -	Versagensart
Probe 1	14,0	0,28	Spalten
Probe 2	14,5	0,29	Spalten
Probe 3	15,0	0,30	Spalten
Mittel	14,5	0,29	

Die für die Verpreßversuche vorgesehenen Ausziehkörper wurden vor dem Einbau in die Prüfmaschine im Labor auf allen Seiten mit Glas-

fasermatten und Verbundmasse abgedichtet. Zuvor wurden auf die obere sowie die seitliche Öffnung des Injektionskanals ein Packer geklebt. Bei den ersten beiden Versuchen trat dennoch Kunstharz durch Leckstellen im unteren verbundfreien Bereich bzw. am seitlichen Packer aus. Die nachfolgenden zwei Versuche AKE5.8 und AKE5.9 konnten mit einem Druck von max. 25 bar erfolgreich verpreßt werden. Der Ausziehkörper AKE5.9 wurde nach Erreichen der vorgesehenen Verbundspannung $\tau_{vd} = 0,7 \tau_{vu}$ mit 300 Lastwechseln zwischen $\tau_v^0 = 0,7 \tau_{vu}$ und $\tau_v^u = 0,4 \tau_{vu}$ beansprucht. Die Anlagen 31 und 32 zeigen die Verbundbereiche nach dem Aufschneiden und Schleifen. Anhand der Bilder kann man die innere Ribbildung wie folgt beschreiben:

Die inneren Risse treten im gesamten Verbundbereich auf. Die Risse sind deutlich in Belastungsrichtung geneigt. Der Neigungswinkel gegen die Stabachse liegt zwischen $\delta = 30^\circ$ und 80° . Die Länge der Verbundrisse beträgt etwa 3 bis 8 mm. Deutlich ist auch die durch die Verschiebung des Stahlstabes entstandene Fuge (lack of fit) zwischen lastabgewandter Rippenfläche und Betonkonsole zu erkennen.

Ausgewählte Verbundrisse wurden mit einem Stereomikroskop in 1:6-facher Vergrößerung fotografiert. Diese Aufnahmen enthält die Anlage 33.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Der versuchsmäßige Nachweis der inneren Rißbildung in Dehn- bzw. Ausziehkörpern durch Injizieren von gefärbtem Kunstharz über in unmittelbarer Nähe des Bewehrungsstabes verlaufende Kanäle bereitete große Schwierigkeiten. Eine Darstellung der Verbundrisse, wie sie z.B. von Goto /3/ durch Farbinjektion gefunden wurde, gelang bei den hier durchgeführten Verpreßversuchen an Dehnkörpern nicht. Das Verpressen der inneren Risse in Ausziehkörpern war jedoch erfolgreich. Die bei der Entwicklung der Verpreßtechnik gewonnenen Erfahrungen bzw. die Problematik derartiger Versuche sollen im folgenden zusammengefaßt werden.

Die Herstellung von Injektionskanälen mittels einbetonierter Schläuche oder Stäbe, die gezogen werden, bereitet keine Schwierigkeiten, wenn auf deren geraden Verlauf geachtet wird. Die Wahl des Abstandes bzw. der Lage des Injektionskanals zum Stahlstab muß jedoch überdacht werden. Da die Verbundrisse eine sehr geringe Tiefe aufweisen (etwa $0,5 d_s$), muß der Kanal nahe am Stab liegen. Durch die Lage des Injektionskanals soll aber der Verbund möglichst wenig gestört werden. Da für den Verbund die Querrippen von entscheidender Bedeutung sind, erscheint es sinnvoll, den Kanal entlang der Längsrippe direkt am Stab anzuordnen. Zum vollflächigen Aufkleben der Injektionspacker bzw. zum Ansetzen der Injektionspumpe wird dann jedoch eine Umlenkung des Kanals an den Versuchskörperenden erforderlich.

Die Abdichtung der Versuchskörper mit der gewählten glasfaserverstärkten Kunstharzbeschichtung erwies sich als geeignet. Bei sorgfältiger Verarbeitung ist der Versuchskörper für das Injektionsgut vollkommen undurchlässig. Nachteil dieser Abdichtung ist, daß das äußere Rißbild nach dem Versuch nicht mehr sichtbar ist.

Die Wahl von Kunstharz als Injektionsgut hat den Vorteil, daß nach dem Aufschneiden der Versuchskörper Rißbreiten meßbar sind. Nach-

teil dieser Methode ist, daß auch bei Einsatz niederviskoser Harze Risse mit einer Breite $w \leq 0,02$ mm nicht mehr zu verpressen sind. Da die Aushärtedauer der Kunstharze von der Menge und der sich entwickelnden Abbinde-temperatur bestimmt wird, muß, um ein Aushärten des Kunstharzes im Riß zu gewährleisten, eine längere Standzeit der Versuchskörper unter Last in Kauf genommen werden.

Das Kunstharz wurde durch die untere Öffnung des Injektionskanals in den Versuchskörper gepreßt, dabei waren die übrigen zum Entlüften solange geöffnet, bis Kunstharz aus dem Packer austrat. Ein mehrmaliges Nachverpressen erwies sich als günstig. Das erfolgreiche Verpressen der inneren Risse an den beiden Ausziehkörpern der Serie AKE5 gelang mit einem relativ hohen Verpreßdruck von etwa 25 bar. Da die Aufzeichnung der Stabendverschiebung v über einen x-y-t-Schreiber bei jedem Nachpreßvorgang einen geringen Verschiebungssprung anzeigte, ist ein Aufweiten der Verbundzone bzw. der Risse durch den hohen Verpreßdruck nicht auszuschließen.

Nach Versuchsende wurde der Dehnkörper in Längsrichtung beidseitig bis etwa zur Stablage eingeschnitten und dann auseinandergebrochen. Dabei blieben Betonreste am Stahl haften, d.h. die Betonkonsolen in der Körperhälfte ohne Stab wurden teilweise zerstört. Durch das Heraussägen des gesamten Verbundbereichs und das anschließende Schleifen trat dieses Problem bei den Ausziehkörpern nicht auf. Da die Sichtbarmachung der inneren Risse stets mit einer Zerstörung des Versuchskörpers verbunden ist, kann nur ein nach einer vorgegebenen Last-Zeit-Geschichte entstandenes Rißbild festgehalten werden.

Aufgrund der bei den bisher durchgeführten Versuchen gewonnenen Erfahrung wird die Technik des Verpressens innerer Risse beherrscht. Damit können die vorgesehenen intensiv instrumentierten Grundsatzversuche zur Gewinnung des inneren Rißbildes an Dehn- und Ausziehkörpern in Abhängigkeit von der Last-Zeit-Geschichte in Angriff genommen werden.

LITERATUR

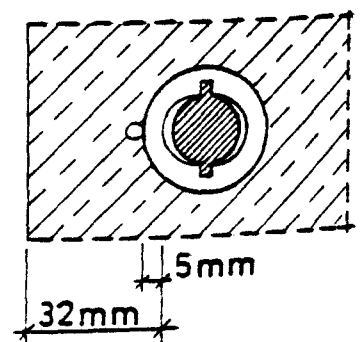
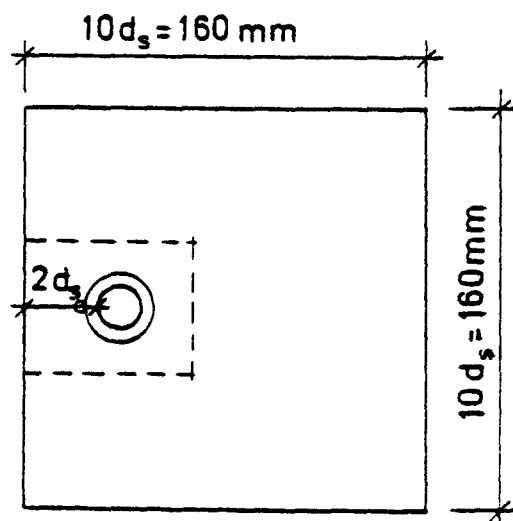
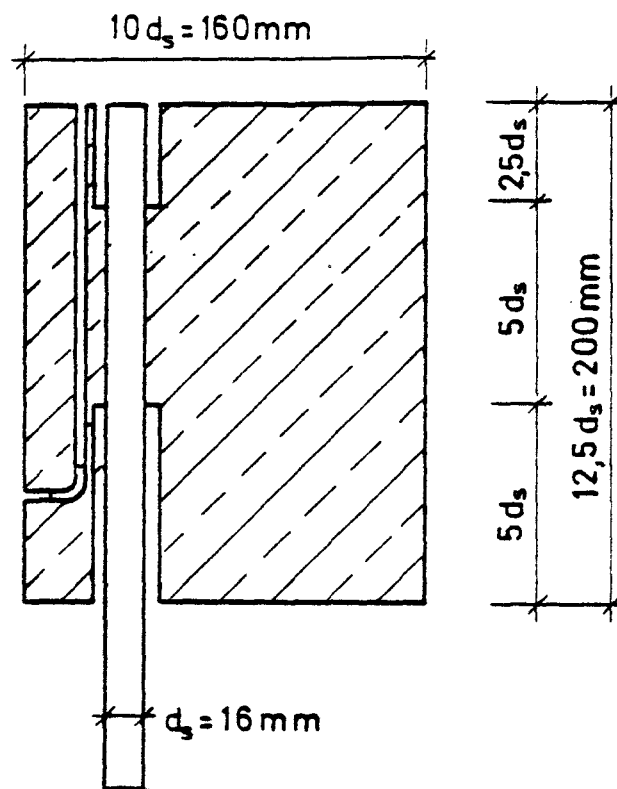
- /1/ König, G., Krips, M.: Zur Rißbreitenbeschränkung im Massivbau, Fortschritte im konstruktiven Ingenieurbau, G. Rehm zum 60. Geburtstag, 1984
- /2/ Broms, B.B.: Technique for Investigation of Internal Cracks in Reinforced Concrete Members. ACI-Journal, Januar 1965
- /3/ Goto, Y.: Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars. ACI-Journal, April 1971
- /4/ Illston, J.M., Stevens, R.F.: Internal Cracking, Concrete, Juli 1972
- /5/ Illston, J.M., Stevens, R.F.: Discussion of the Paper by Y. Goto: Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars. ACI-Journal, Oktober 1971
- /6/ Trost, H., Cordes, H., Thormählen, U., Hagen, M.: Teilweise Vorspannung: Verbundfestigkeit von Spanngliedern und ihre Bedeutung für Rißbildung und Rißbreitenbeschränkung. DAfStb Heft 310, 1980
- /7/ Kupfer, H., Janovic, K., Müller, H.H.: Versuche an Dehnkörpern zur Bestimmung des Verlaufs der Rißbreite im Einpreßmörtel und in der Umgebung des Spanngliedes. Bericht Nr. 1330, Lehrstuhl für Massivbau, TU München, 1977
- /8/ Vos, E.: Influence of Loading Rate and Radial Pressure on Bond in Reinforced Concrete. Dissertation TH Delft 1983
- /9/ Watstein, D., Mathey, R.G.: Width of Cracks in Concrete at the Surface of Reinforcing Steel Evaluated by Means of Tensile Bond Specimens. ACI-Journal, Juli 1959
- /10/ Beeby, A.W.: Concrete in the Oceans, Cracking and Corrosion. Technical Report No. 1, Cement and Concrete Association, 1978
- /11/ Lutz, L.A., Gergely, P.: Mechanics of Bond and Slip of Deformed Bars in Concrete. ACI-Journal, November 1967

TEIL III

A n l a g e n

Abmessungen und Bewehrung der Dehnkörper

Versuchskörper Bezeichnung	Abmessungen	Bewehrung	Verpreßlast KN	Bemerkungen
DK 1	∅ 280 mm L = 1,2 m	BSt III U 1 ∅ 28 mm	190	Nut in Versuchskörpermitte instrumentierter Stab
DK 2	∅ 150 mm L = 1,2 m	BSt III U 1 ∅ 28 mm Wendel ∅ 6 mm	160	
DK 3 DK 4	∅ 150 mm L = 1,2 m	BSt III U 1 ∅ 28 mm Wendel ∅ 6 mm	150 175	Nut in Versuchskörpermitte DK 4: 10 Lastwechsel
DK 5 DK 6	∅ 150 mm L = 1,2 m	BSt III U 1 ∅ 28 mm	150 200	DK 5: 9500 Lastwechsel
DK 7	∅ 150 mm L = 660 mm	KS 60 1 ∅ 20 mm	100	Nut in Versuchskörpermitte 100 Lastwechsel
MK 1 MK 2	∅ 100 mm L = 1,2 m	BSt III U 1 ∅ 16 mm	50 75	MK 1: 100 Lastwechsel, Nut MK 2: 100 Lastwechsel, Nut MK = Mörtelkörper



Exzentrischer Ausziehkörper der Serie AKE 5

Zusammenstellung der verwendeten Betone und Mörtel

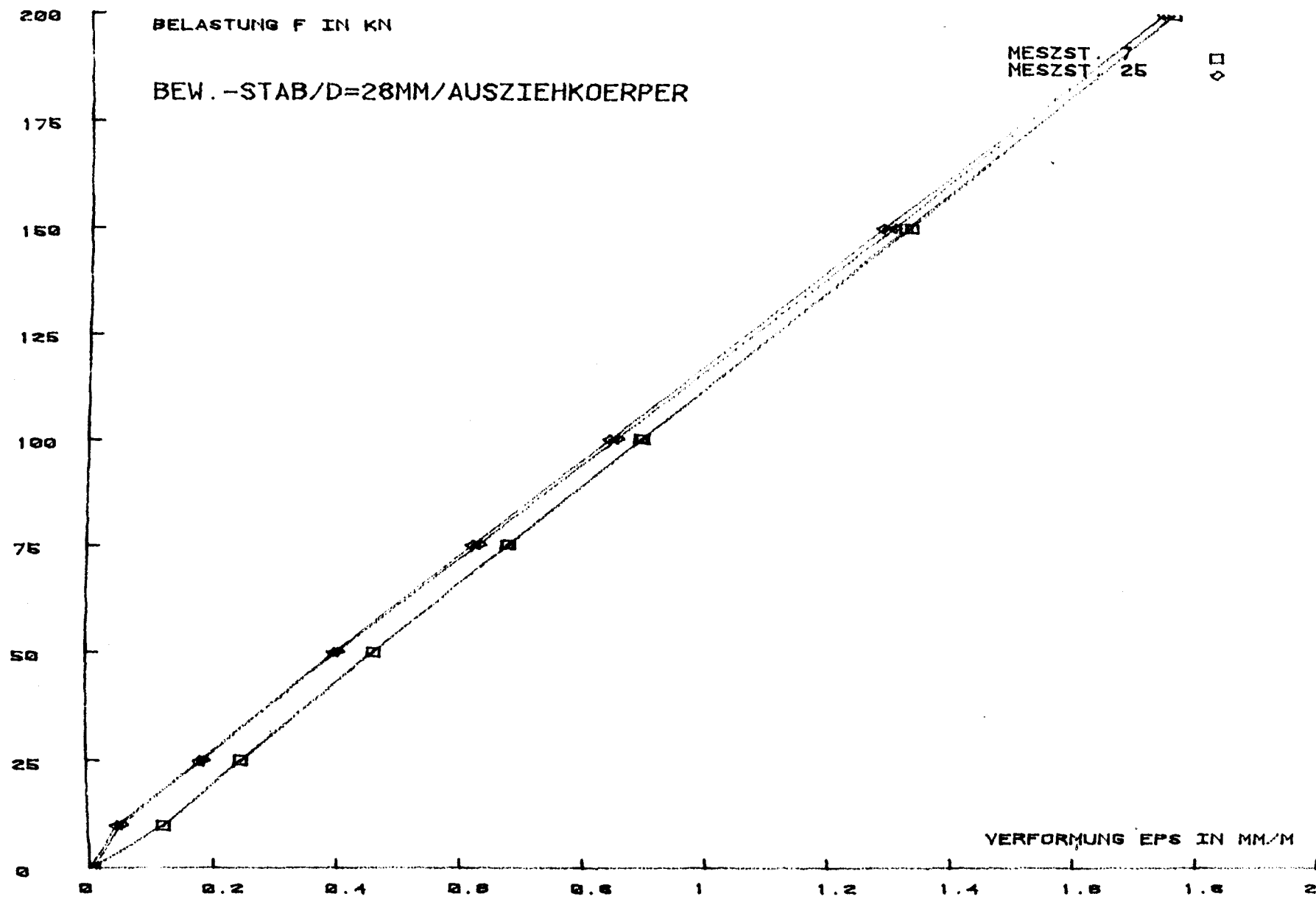
		DK 1, DK 2, DK 3 AK 1 DK 4	DK 5 DK 6	DK 7	MK 1, MK 2 AKE5
Zementgehalt	kg/m³	347	320	335	490
Zuschlaggehalt	kg/m³	1768	1800	1800	1500
Wassergehalt	kg/m³	225	210	210	271
W/Z-Wert	-	0,65	0,65	0,63	0,55
Verdichtungsmaß	-	1,07	-	-	1,10
Ausbreitmaß	cm	40,7	-	-	40,0
Frischbeton- rohdichte	kg/m³	2,34	-	-	2,24

Festigkeitskennwerte der verwendeten Betone und Mörtel

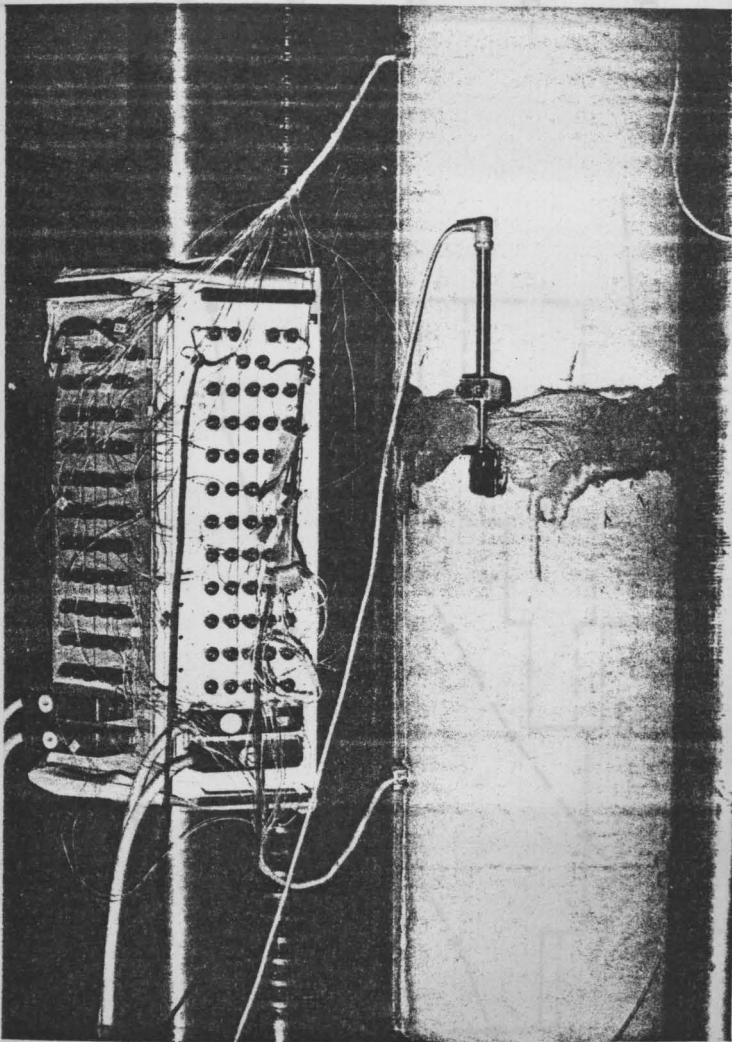
Versuchskörper	β_{w28} N/mm ²	$\beta_w(t_0)$ N/mm ²	t_0 Tage	$\beta_{sz}(t_0)$ N/mm ²
DK 1, AK 1	48,0	52,0	56	3,8
DK 2	-	15,0	5	1,7
DK 3	48,0*	48,0*	28	2,1
DK 4	48,0*	48,0*	30	2,1
DK 5, DK 6	-	22,0	43	1,7
DK 7	-	33,0	27	2,75
MK 1, MK 2 AKE5	48,0	50,0	76	4,5* ²

* Würfelkantenlänge 20 cm

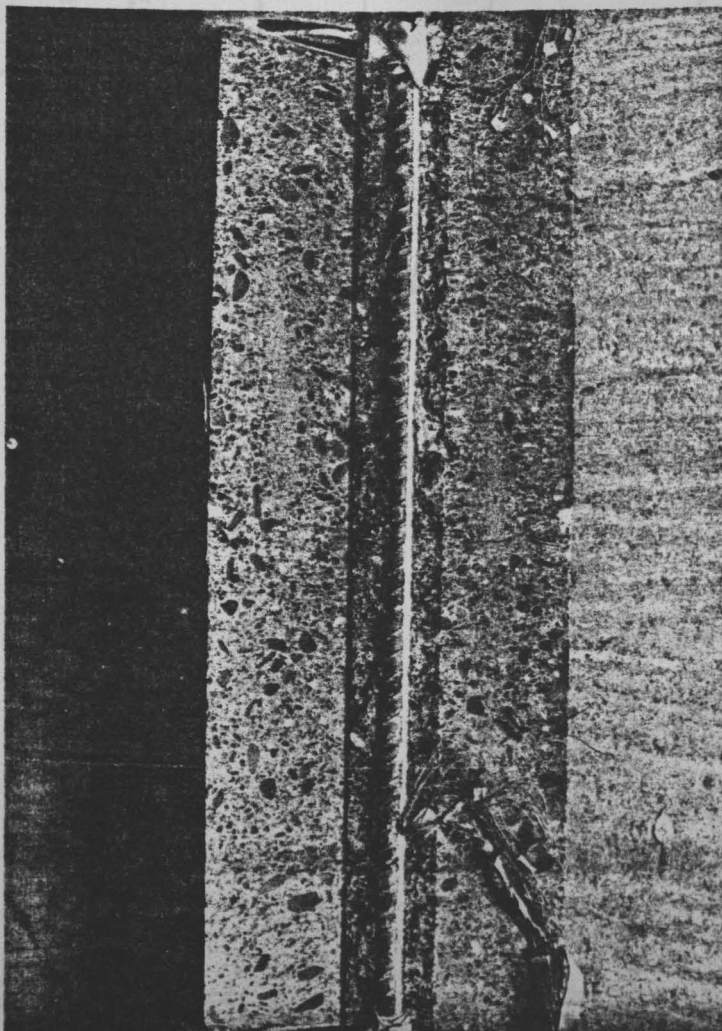
*² geprüft an Zylindern h=4 cm, d=5 cm



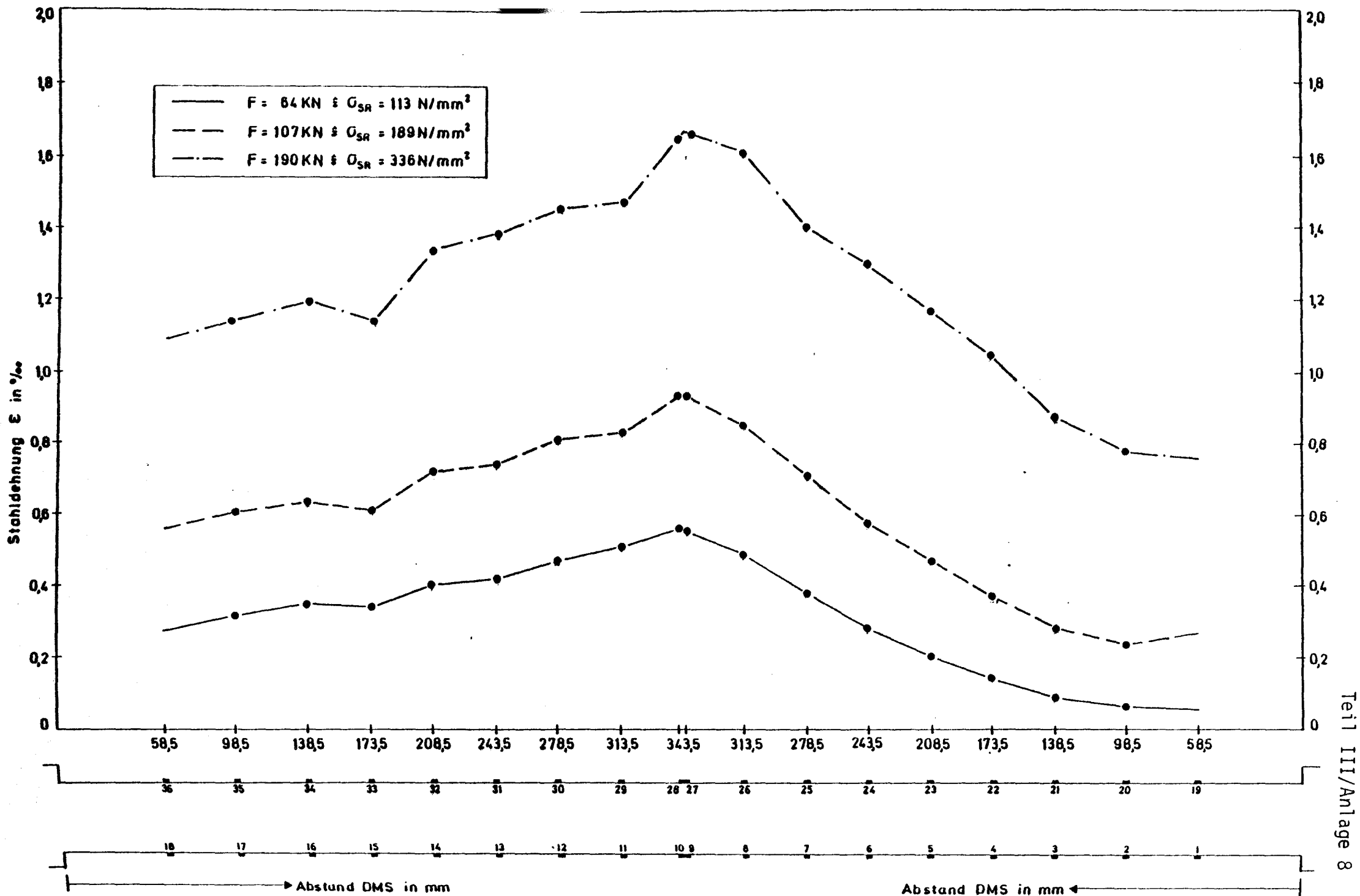
Eichkurven der Dehnmeßstreifen Nr. 7 und Nr. 25, Dehnkörper DK 1

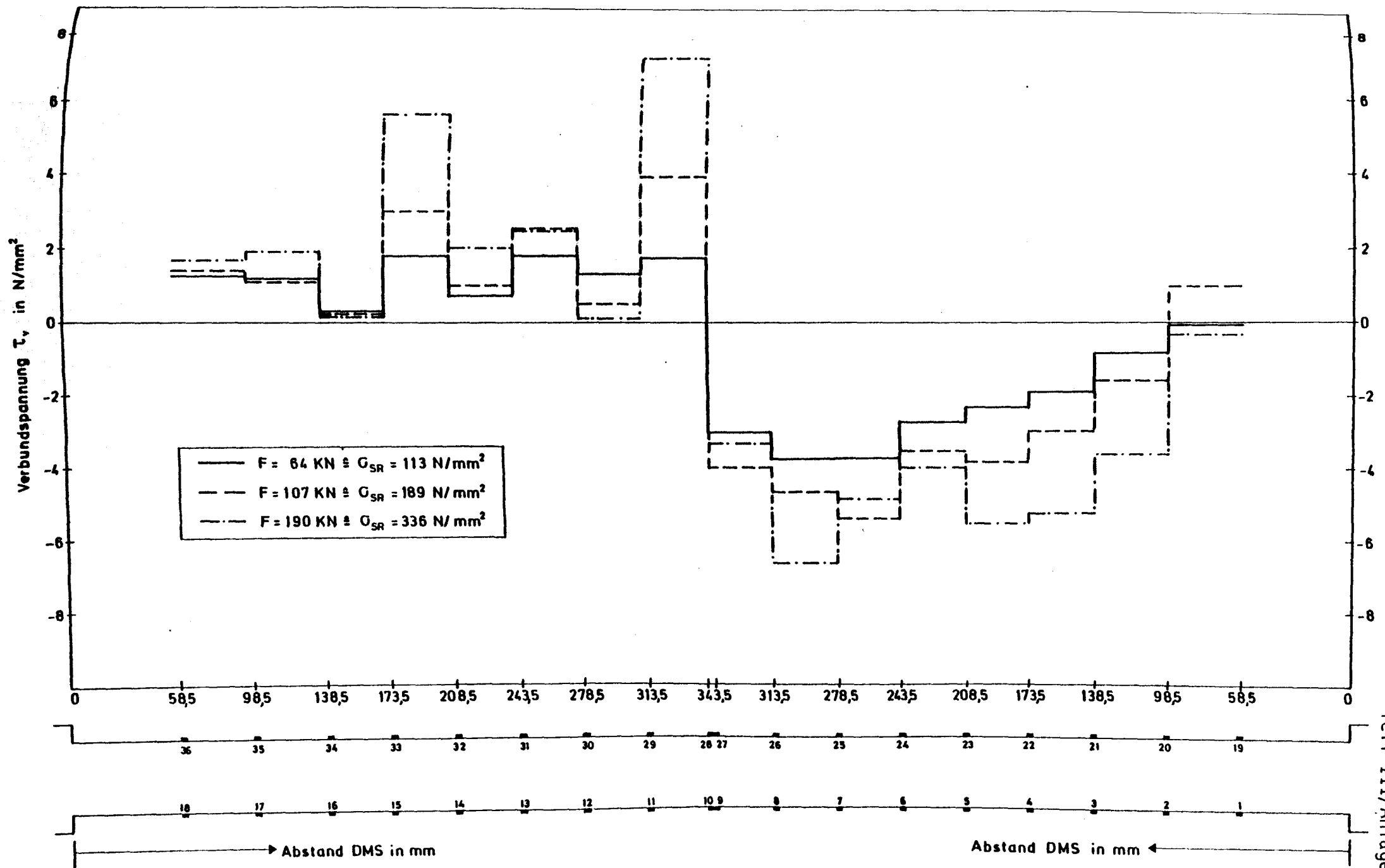


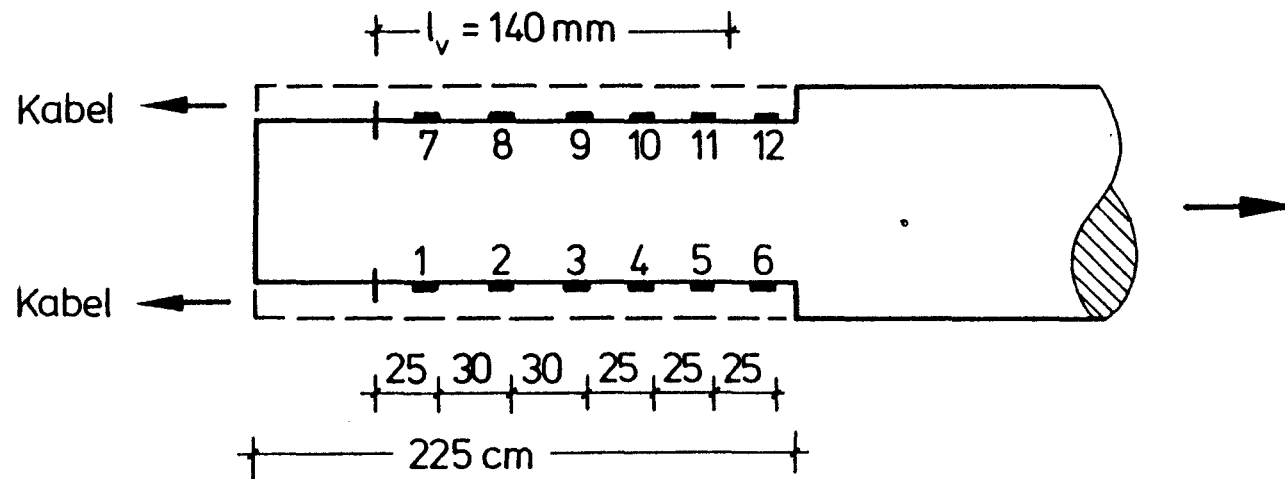
Dehnkörper DK 1
in der Prüfanlage



Dehnkörper DK 1
nach dem Aufsägen







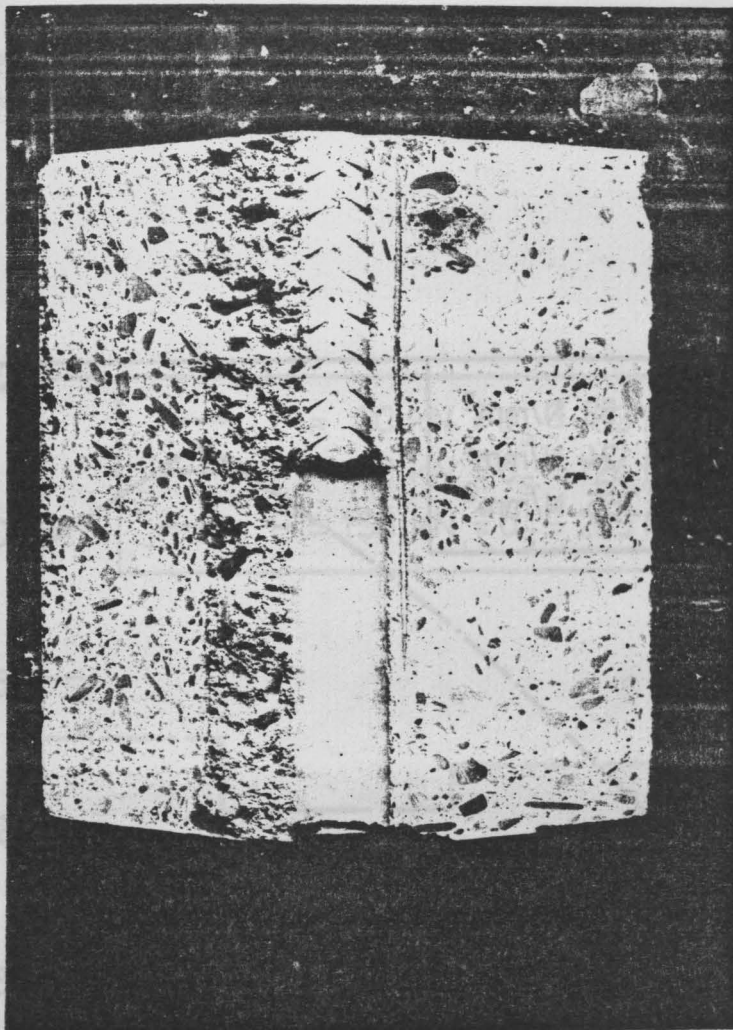
DMS Typ 3/120 L4 51

Fa. Hottinger

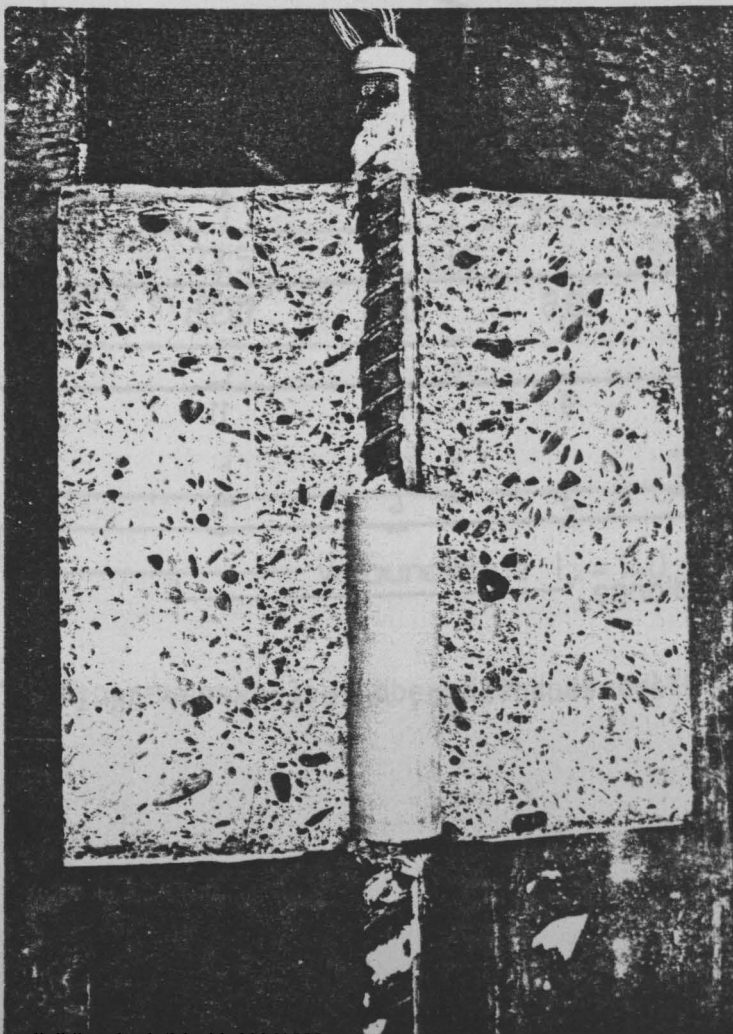
Meßgitter : $l = 3,0 \text{ mm}$, $b = 1,4 \text{ mm}$

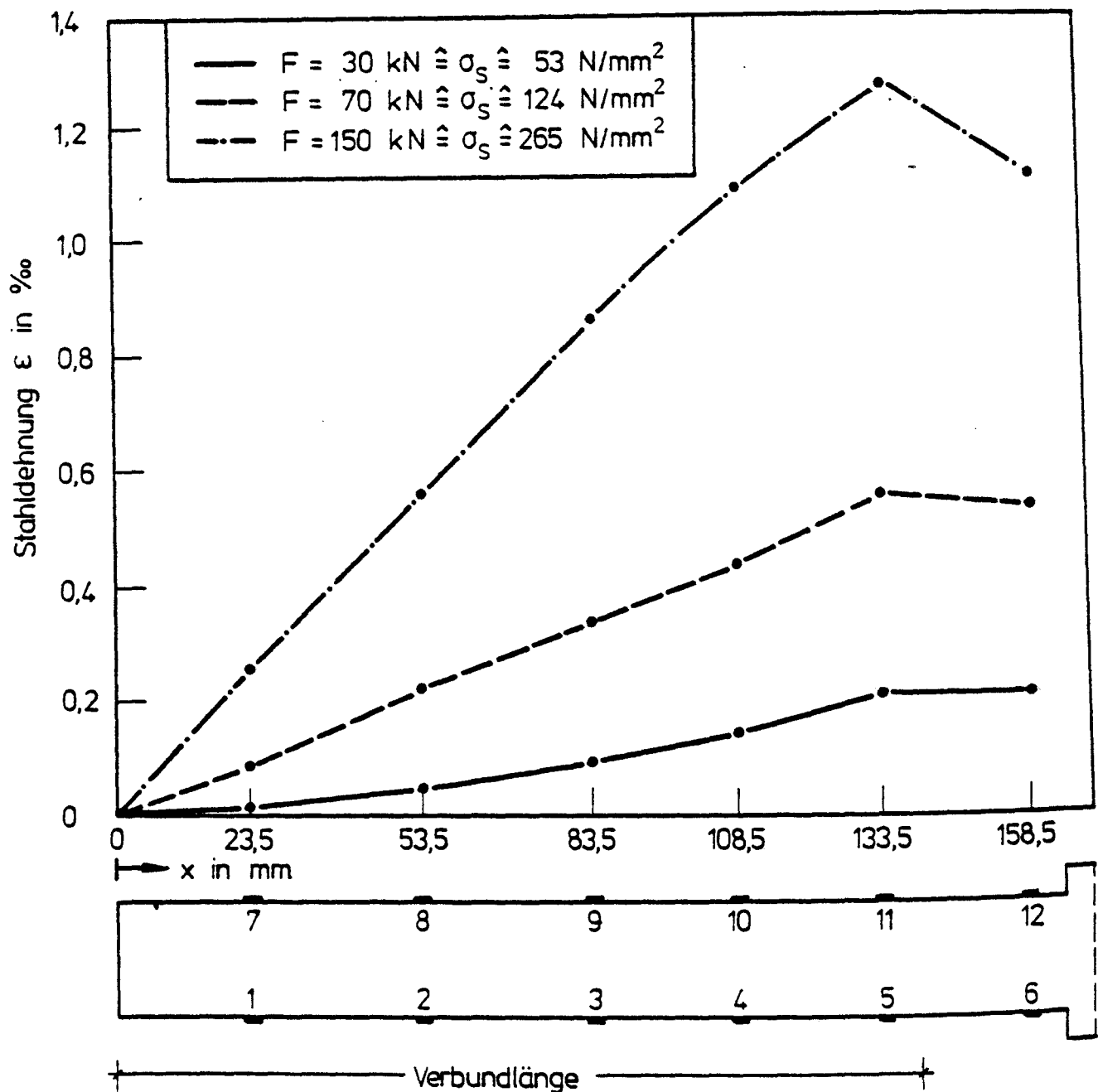
Träger : $l = 8,3 \text{ mm}$, $b = 4,7 \text{ mm}$

Anordnung der Dehnmeßstreifen in der Nut, Ausziehkörper AK 1

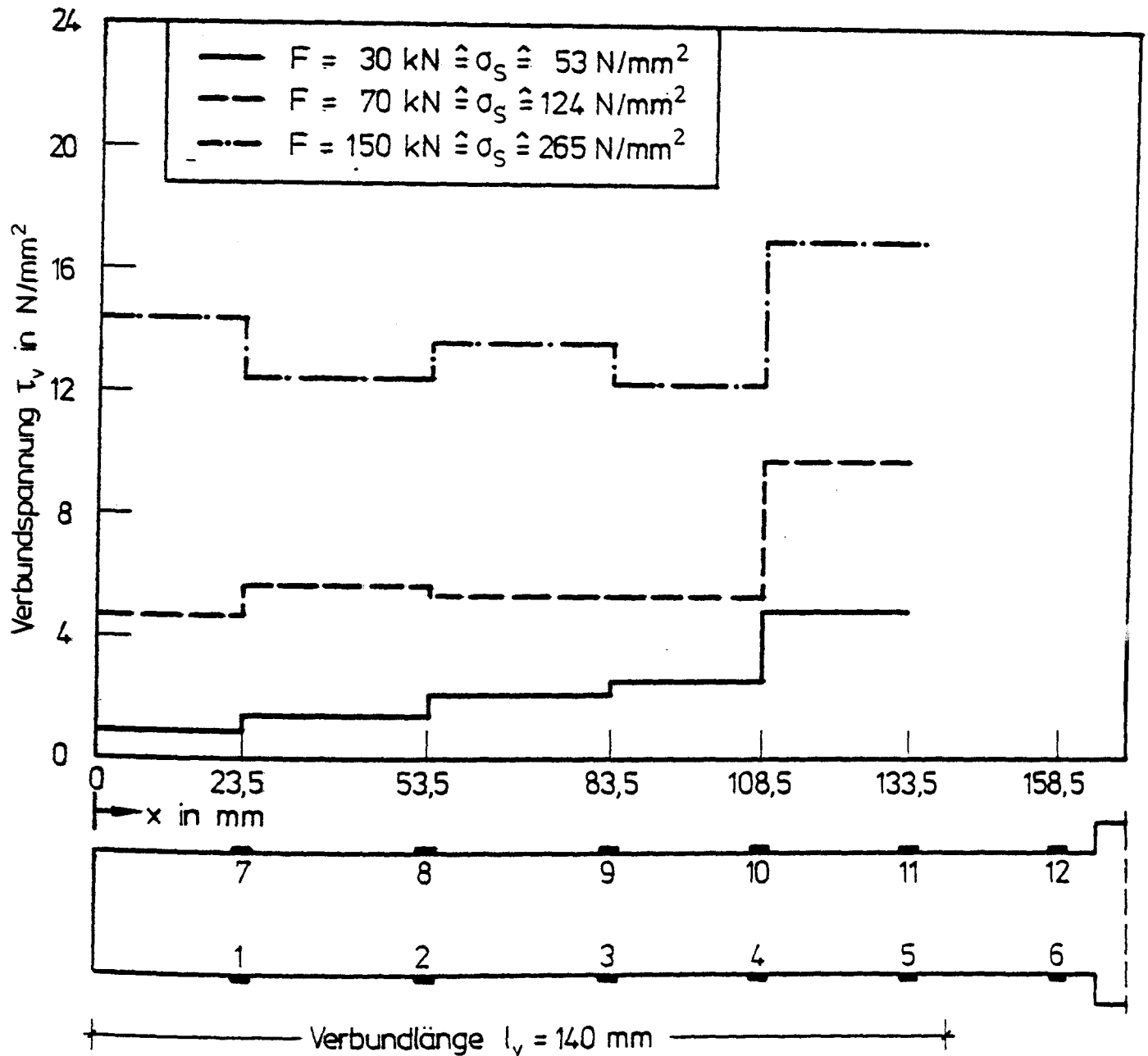


Ausziehkörper AK 1
nach dem Aufsägen

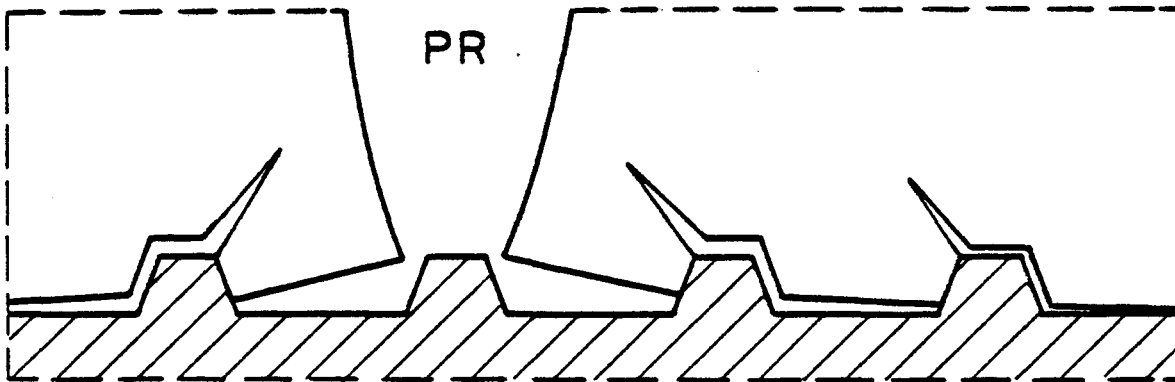




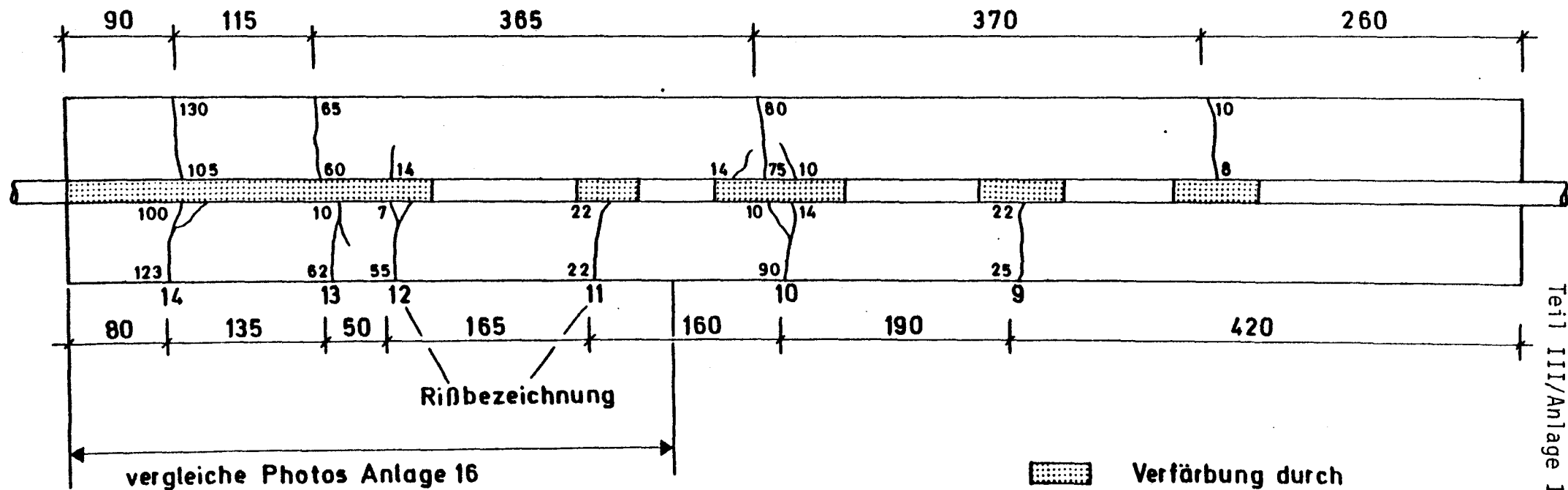
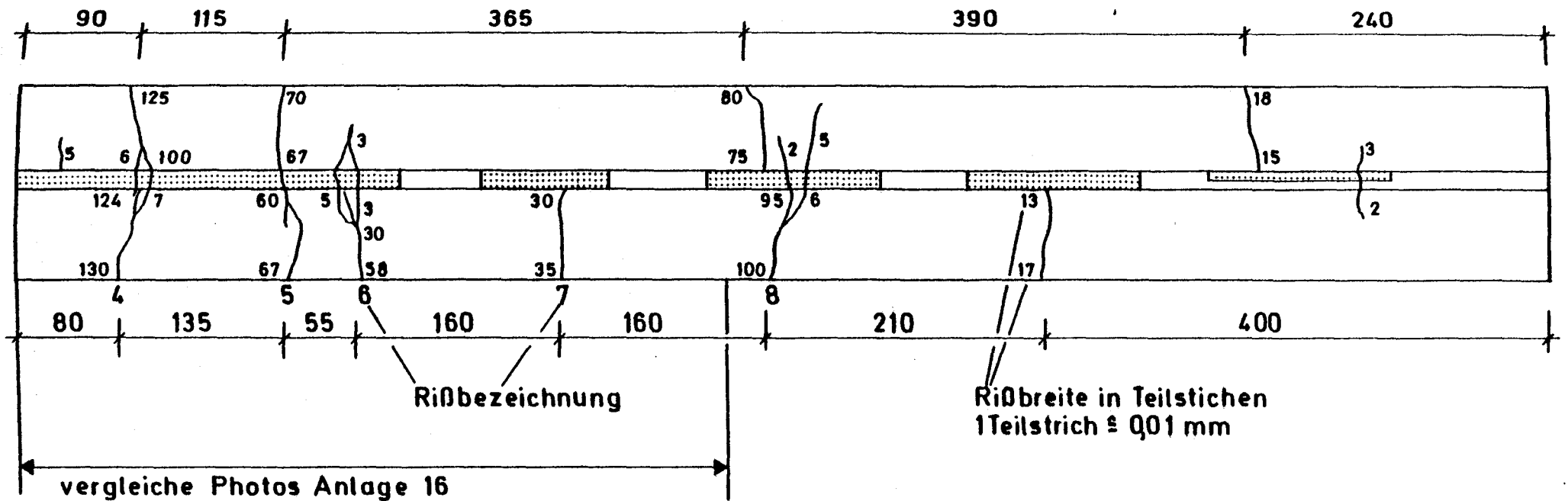
Stahldehnungsverlauf über die Verbundlänge, Ausziehkörper AK 1



Verbundspannungsverlauf über die Verbundlänge l_v , Ausziehkörper AK 1

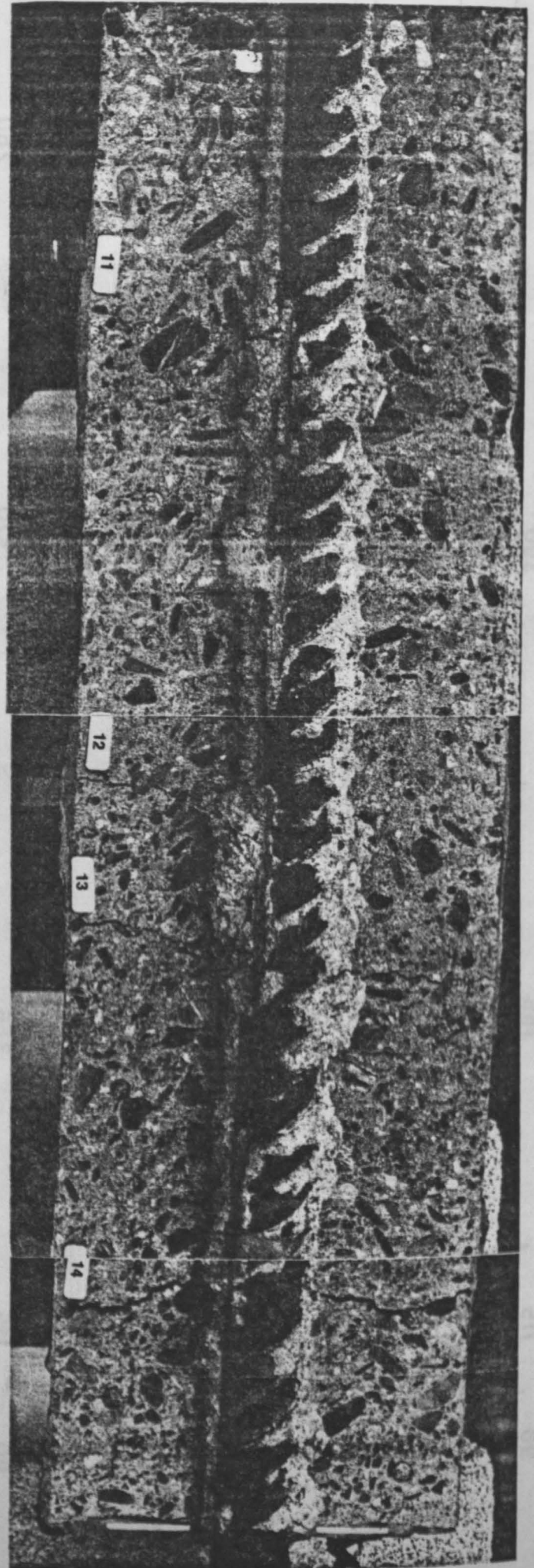
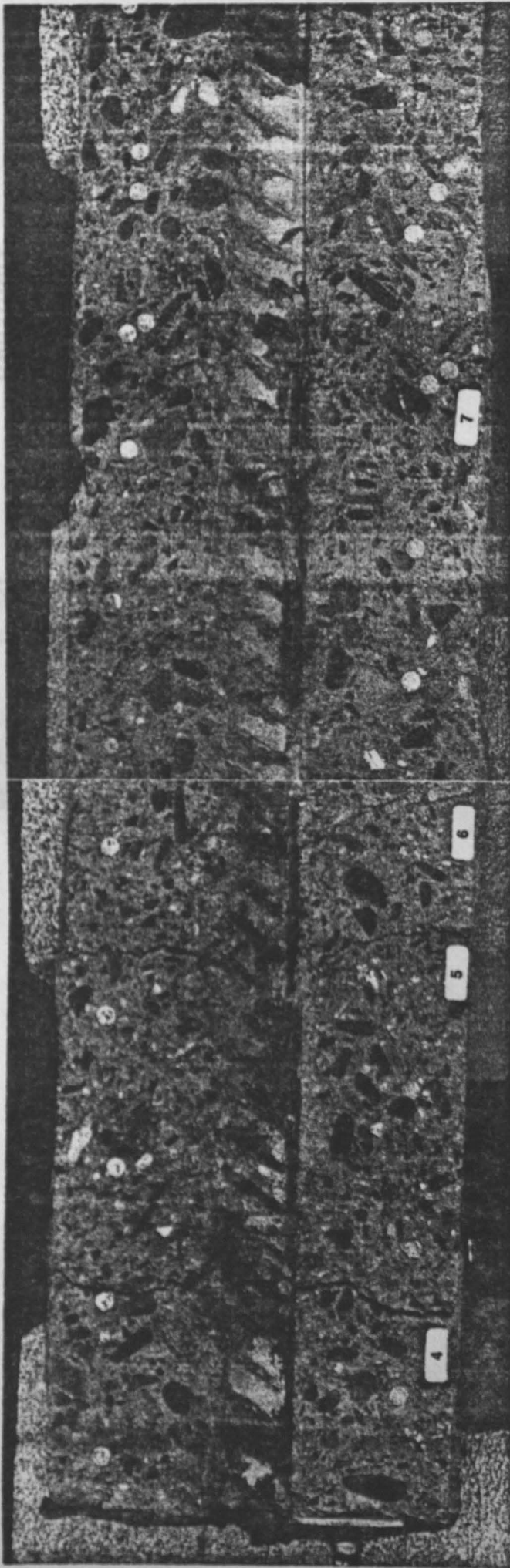


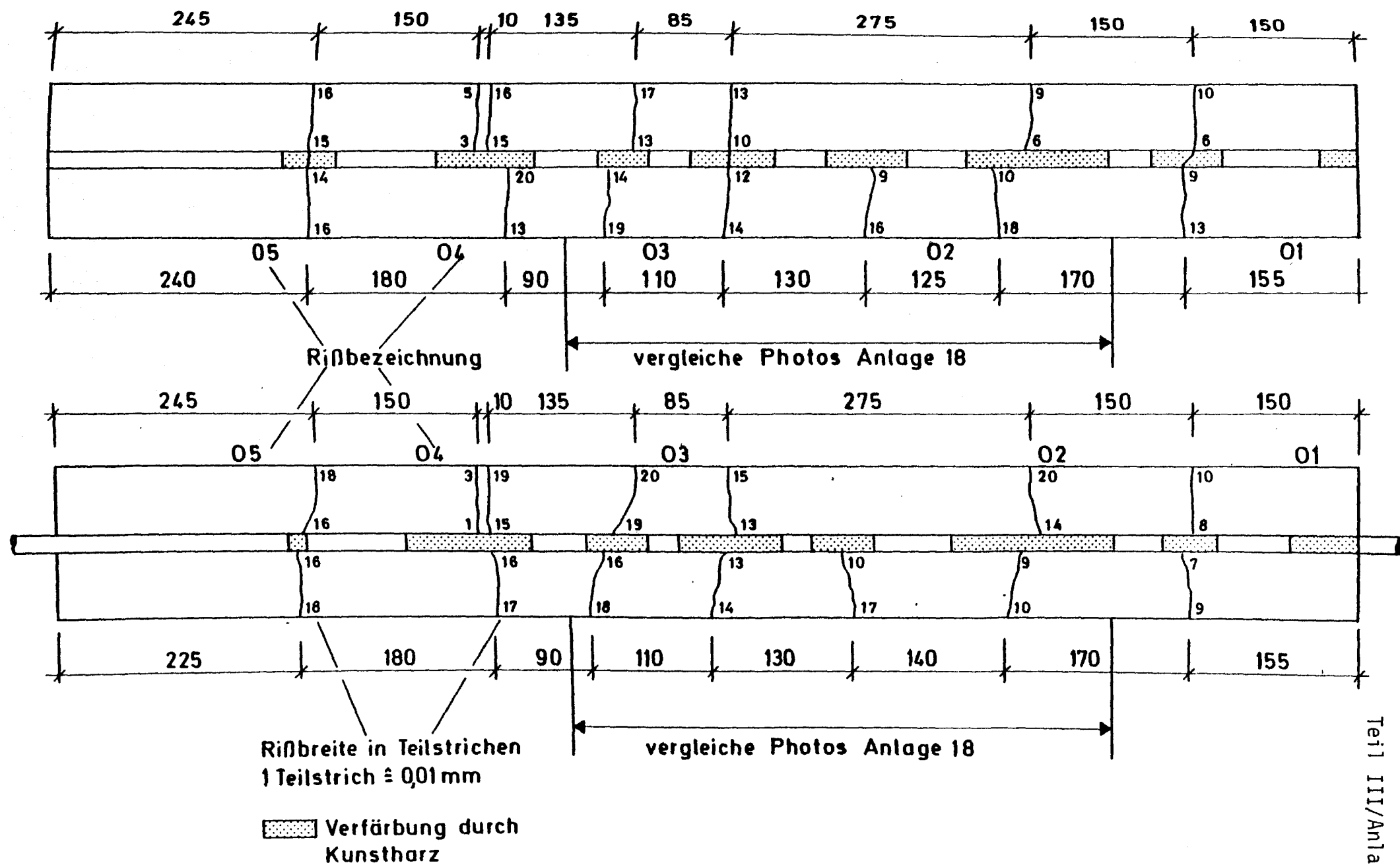
Ablösung des Betons von der Stahloberfläche in Rißnähe nach Lutz und Gergely /11/



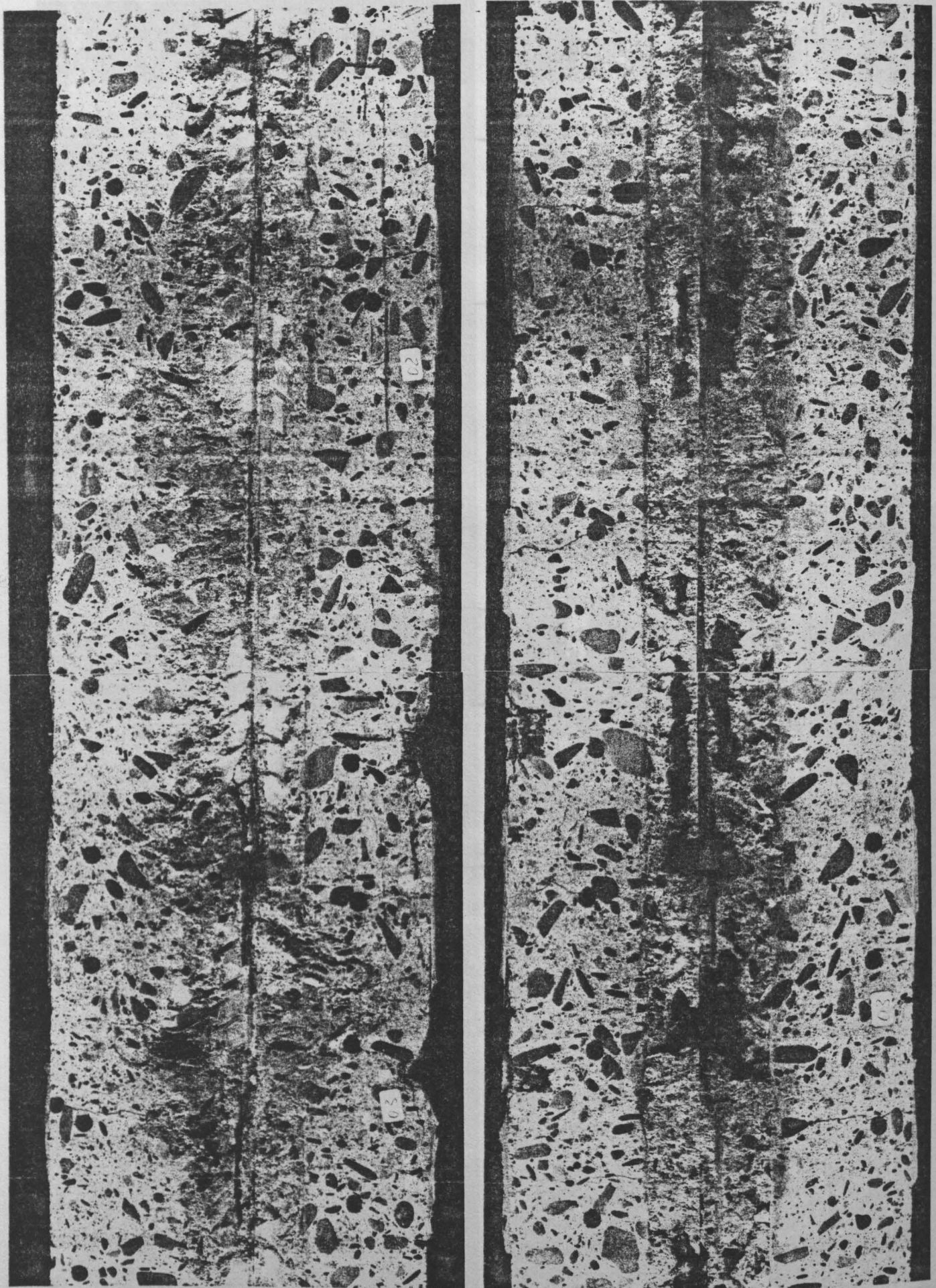
Dehnkörper DK 2: Inneres Rißbild

Teil III/Anlage 15

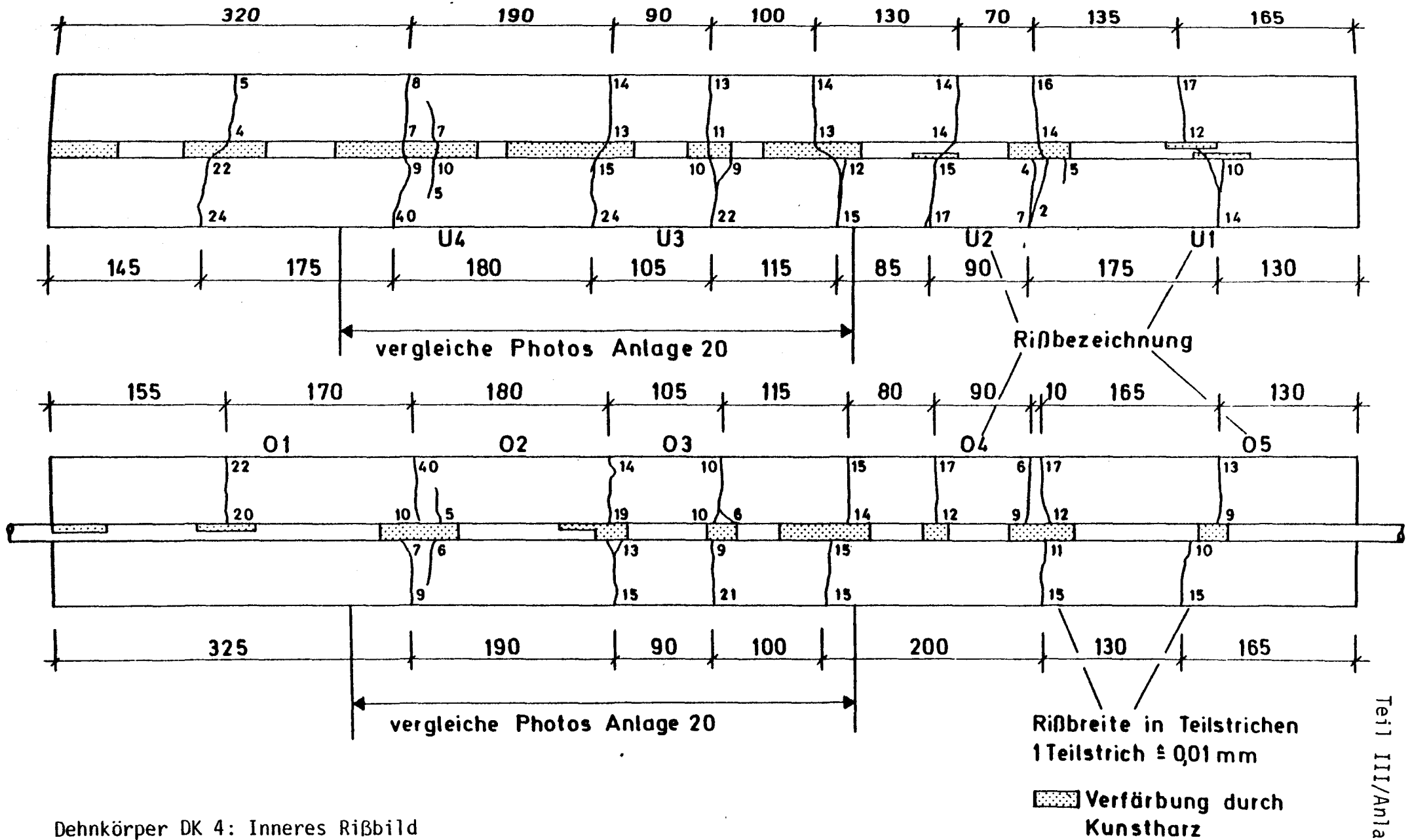




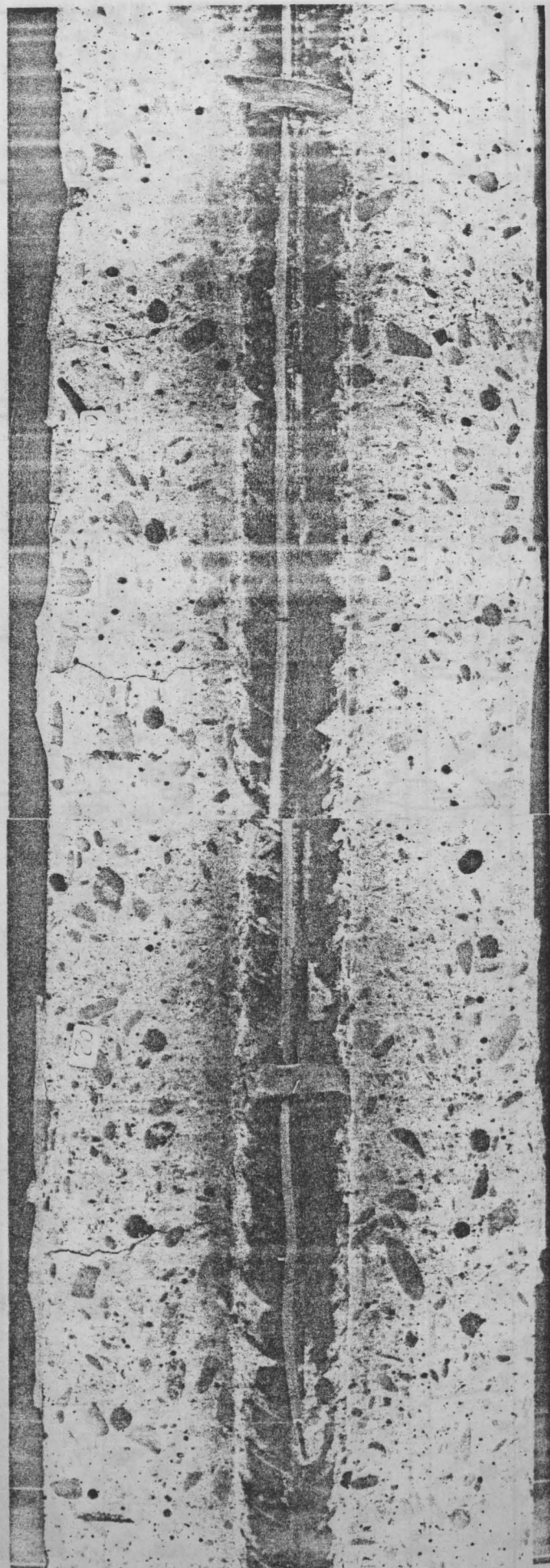
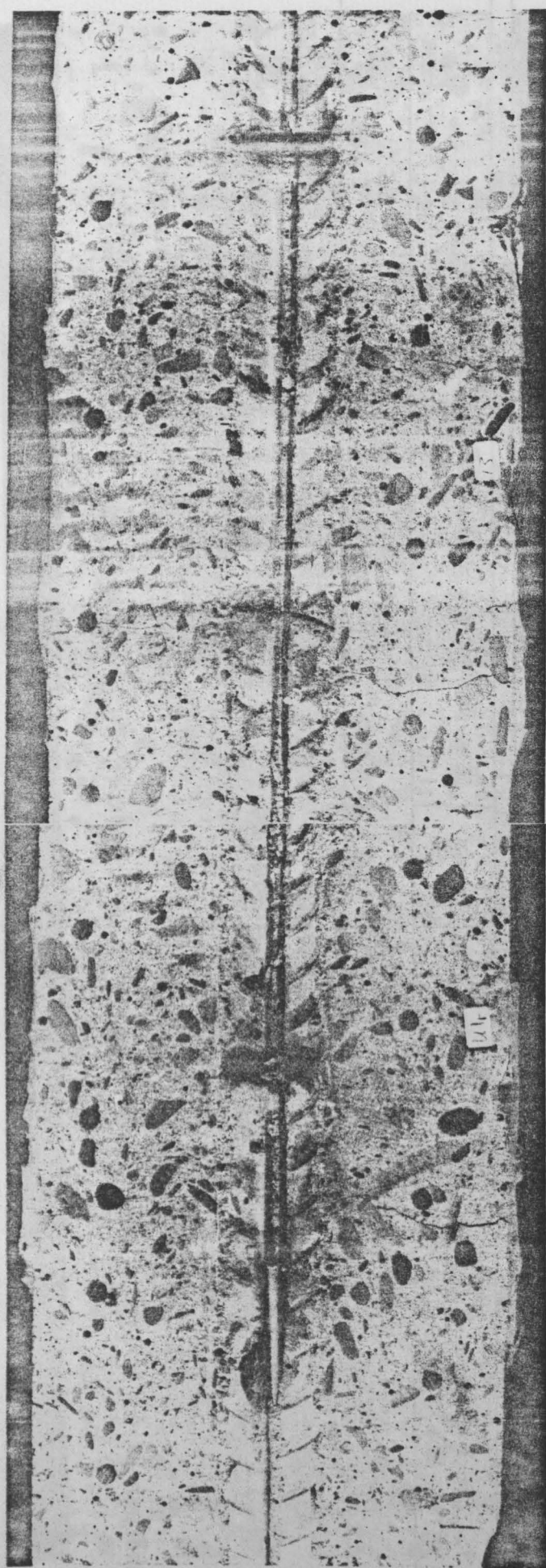
Dehnkörper DK 3: Inneres Rißbild



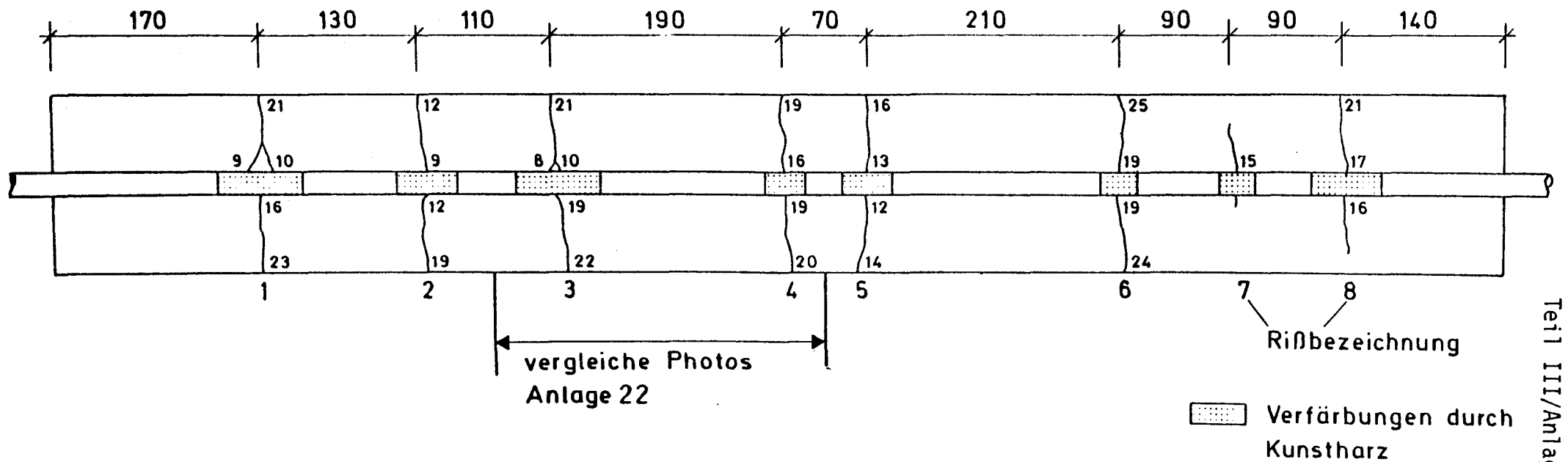
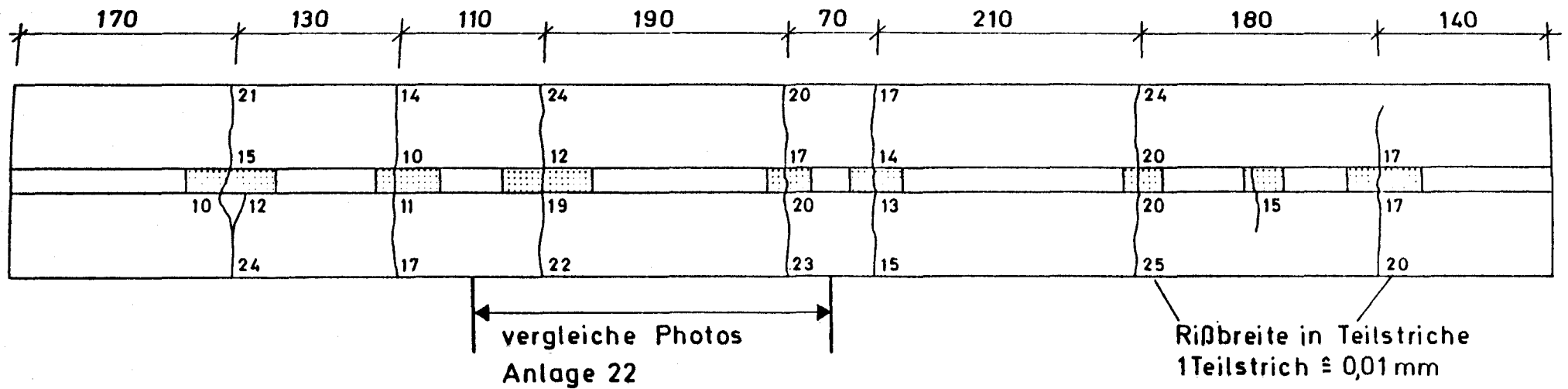
Inneres Rißbild im mittleren Teil des Dehnkörpers DK 3, vergleiche Anlage 17



Dehnkörper DK 4: Inneres Rißbild



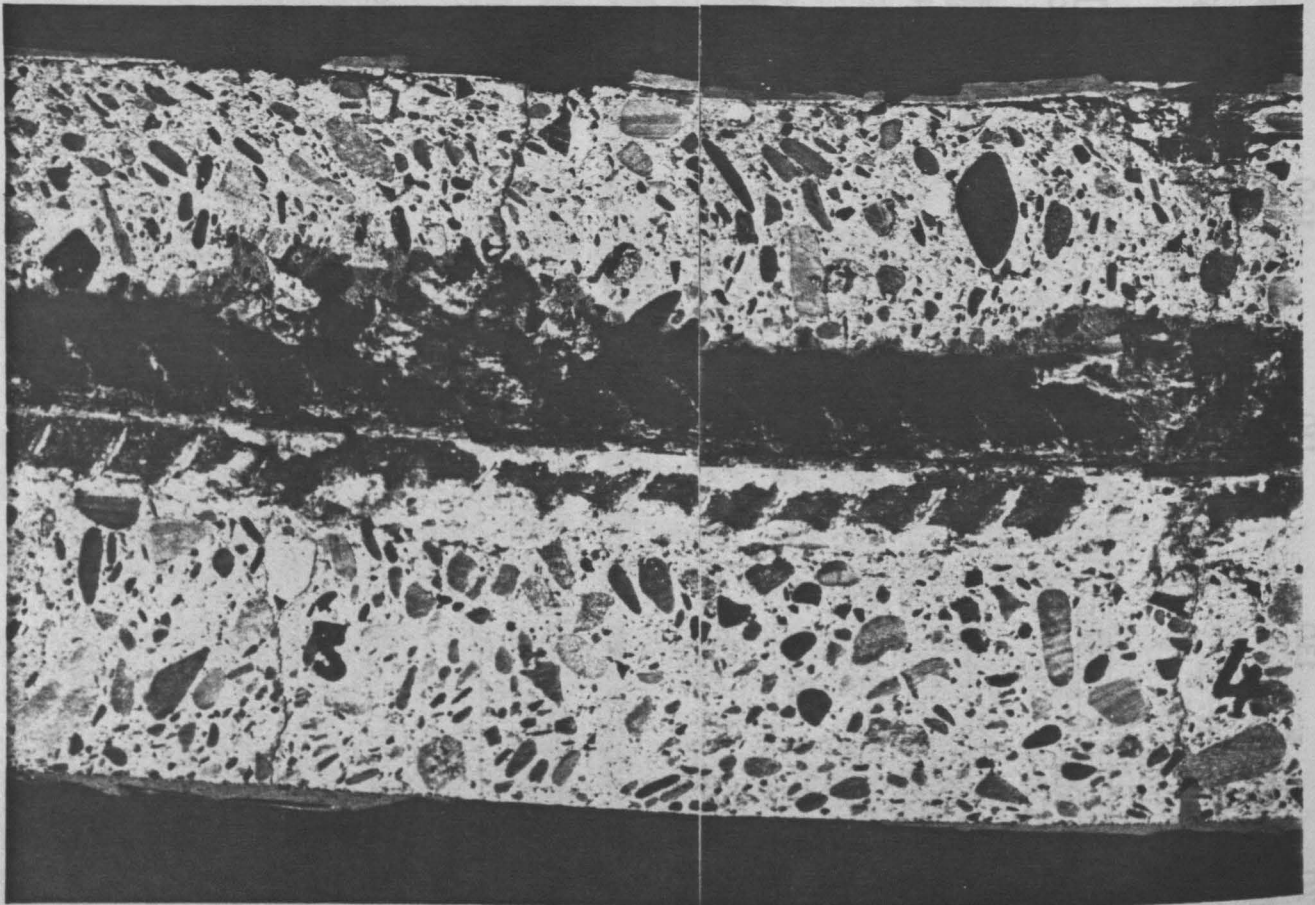
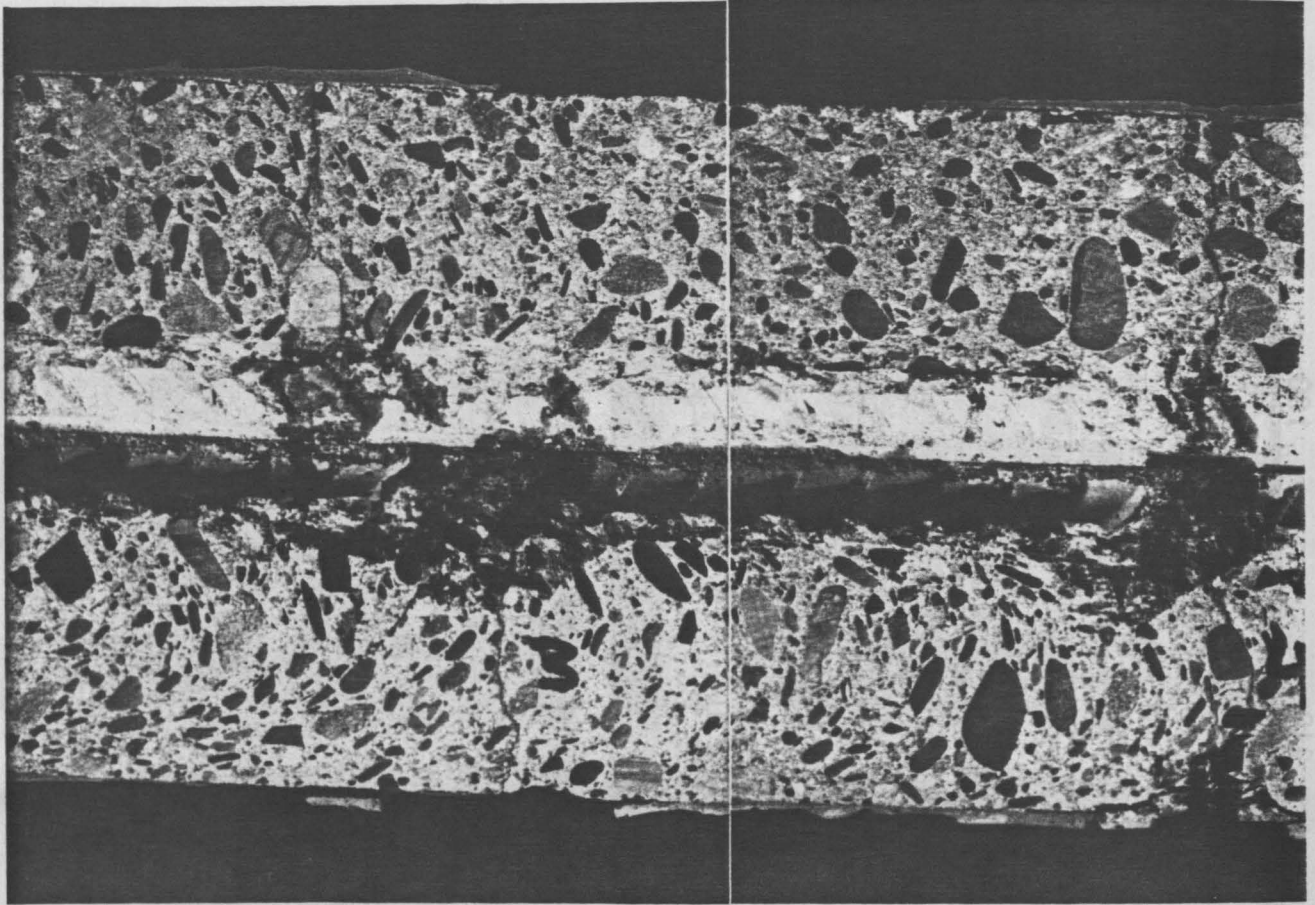
Inneres Rißbild im mittleren Teil des Dehnkörpers DK 4, vergleiche Anlage 19



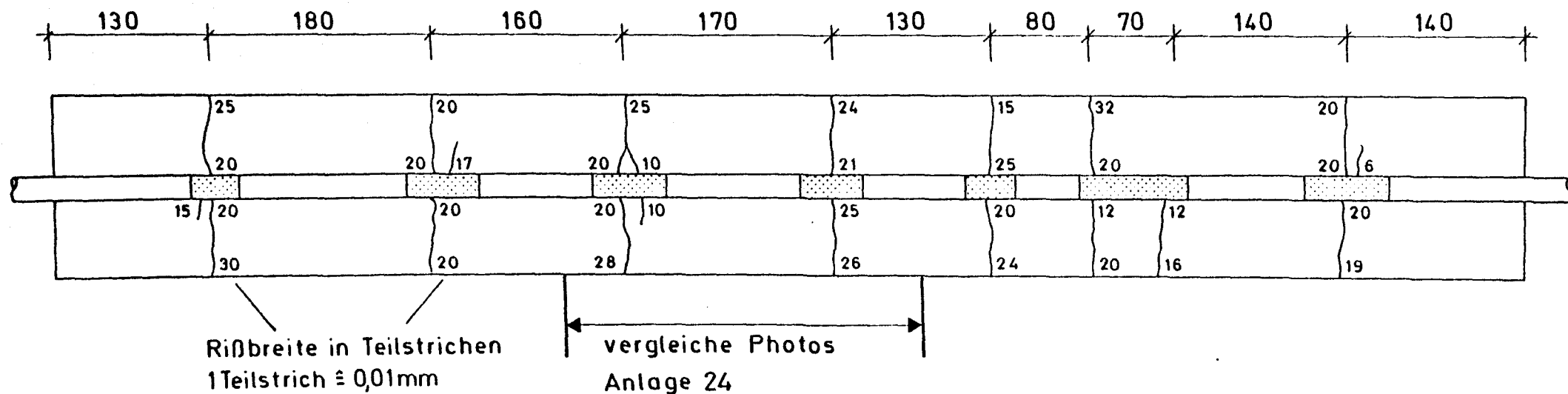
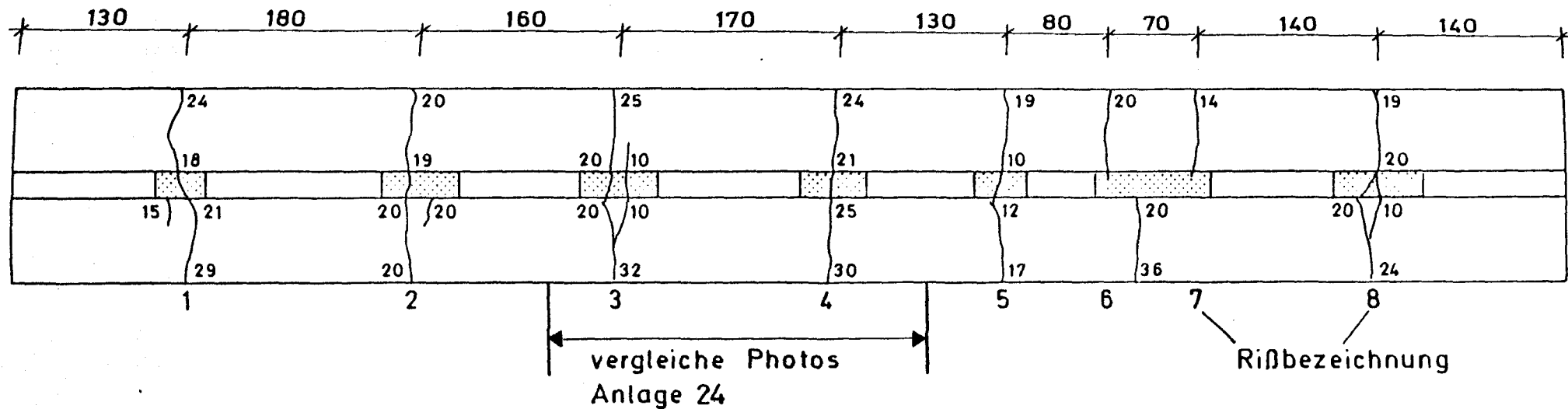
Dehnkörper DK 5: Inneres Rißbild

Teil III/Anlage 21

IS apcAnA\III\ThaT

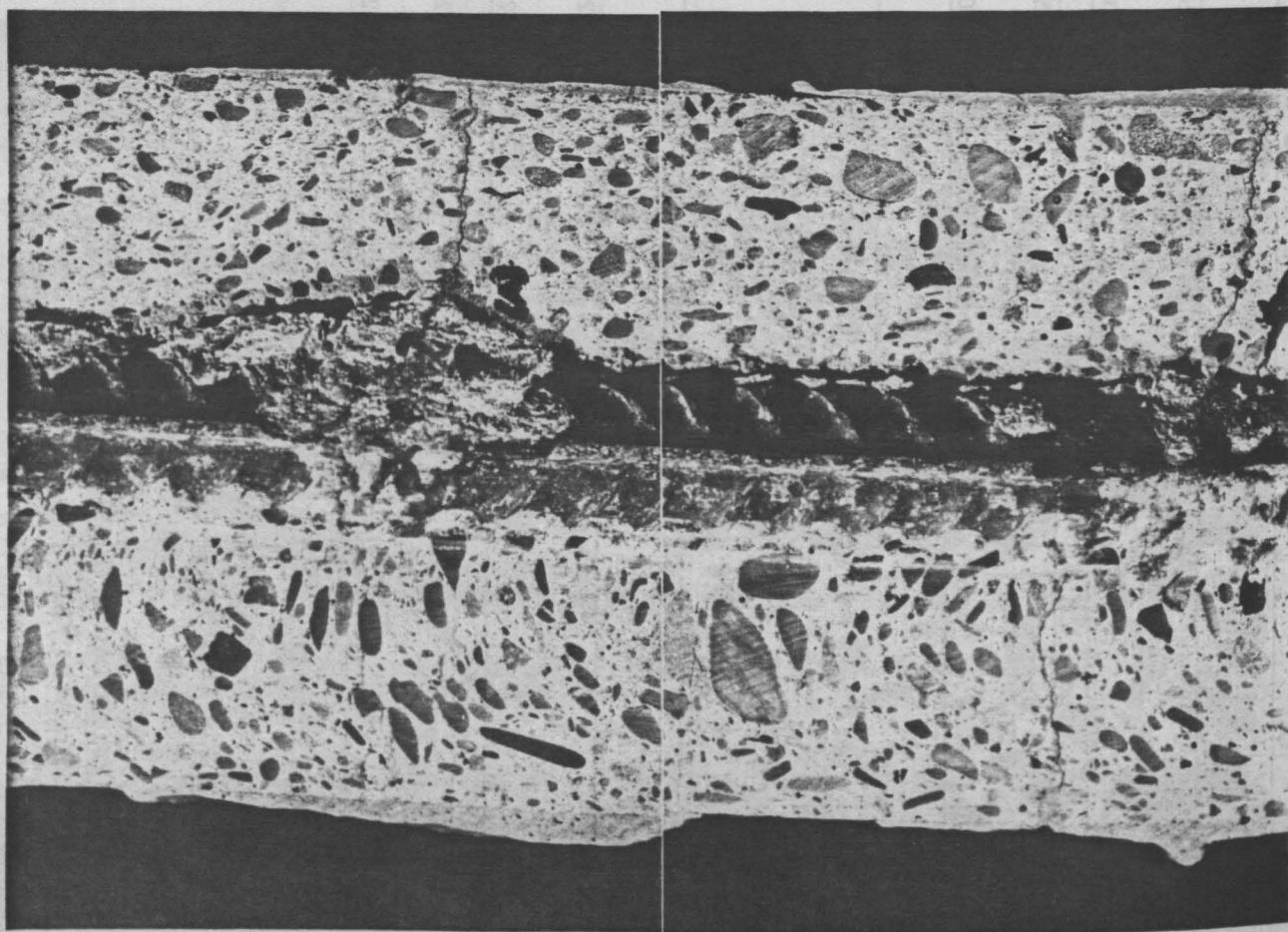
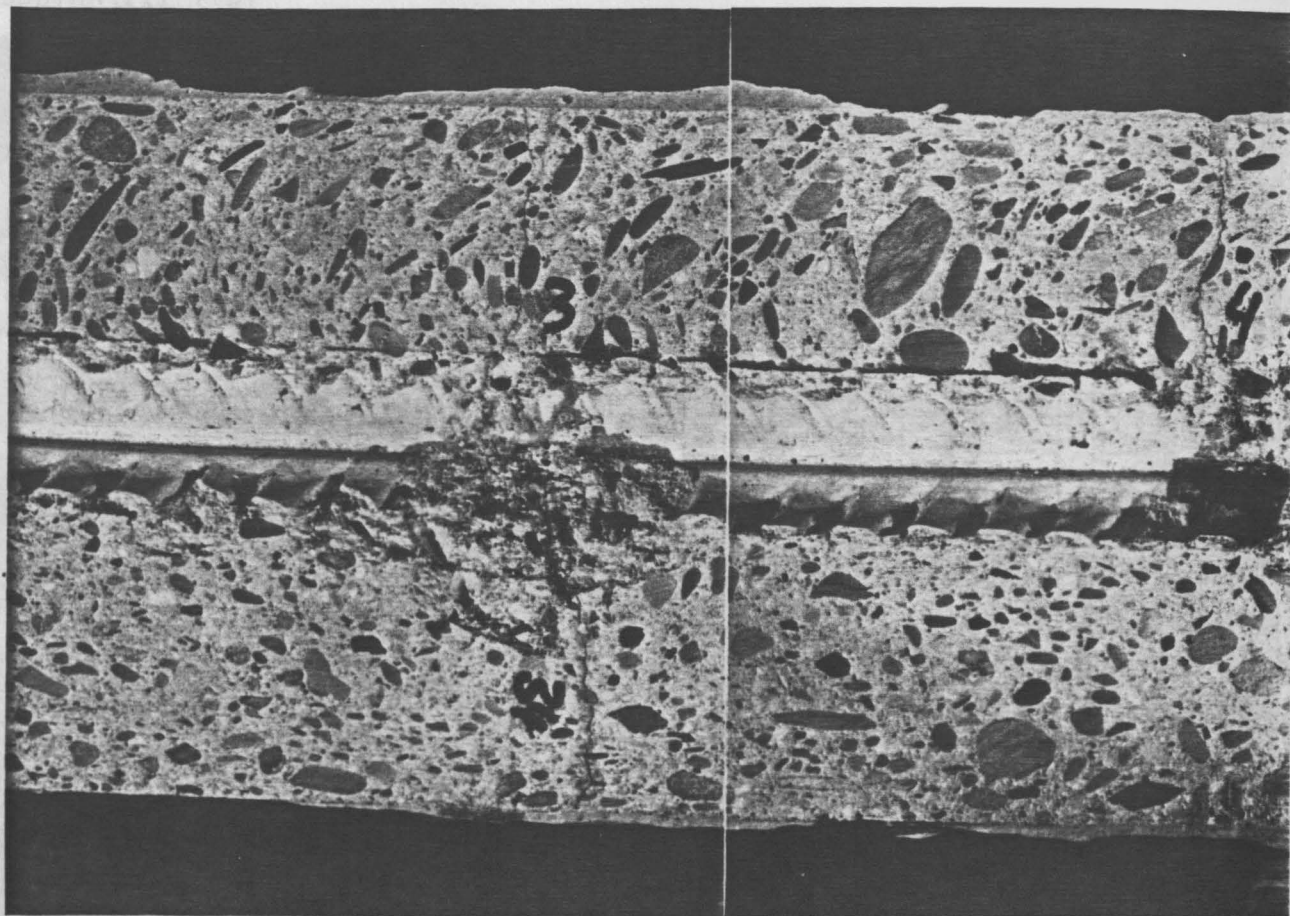


Inneres Rißbild im mittleren Teil des Dehnkörpers DK 5, vergleiche Anlage 21

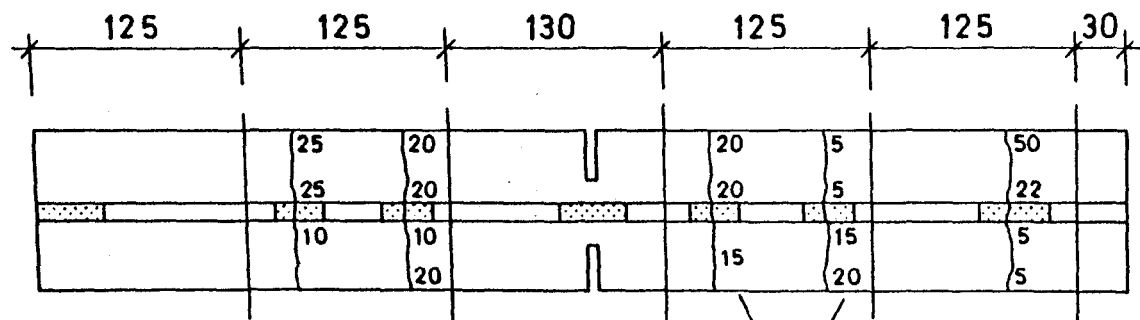
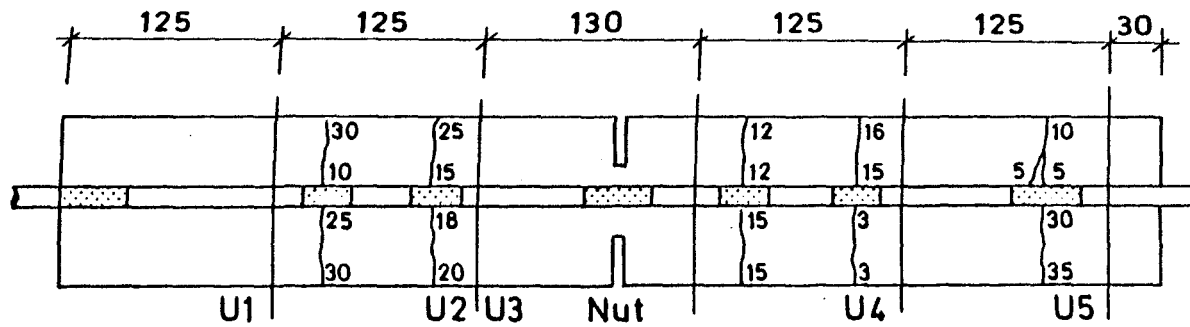


Verfärbung durch Kunstharz

Dehnkörper DK 6: Inneres Rißbild



Inneres Rißbild im mittleren Teil des Dehnkörpers DK 6, vergleiche Anlage 23

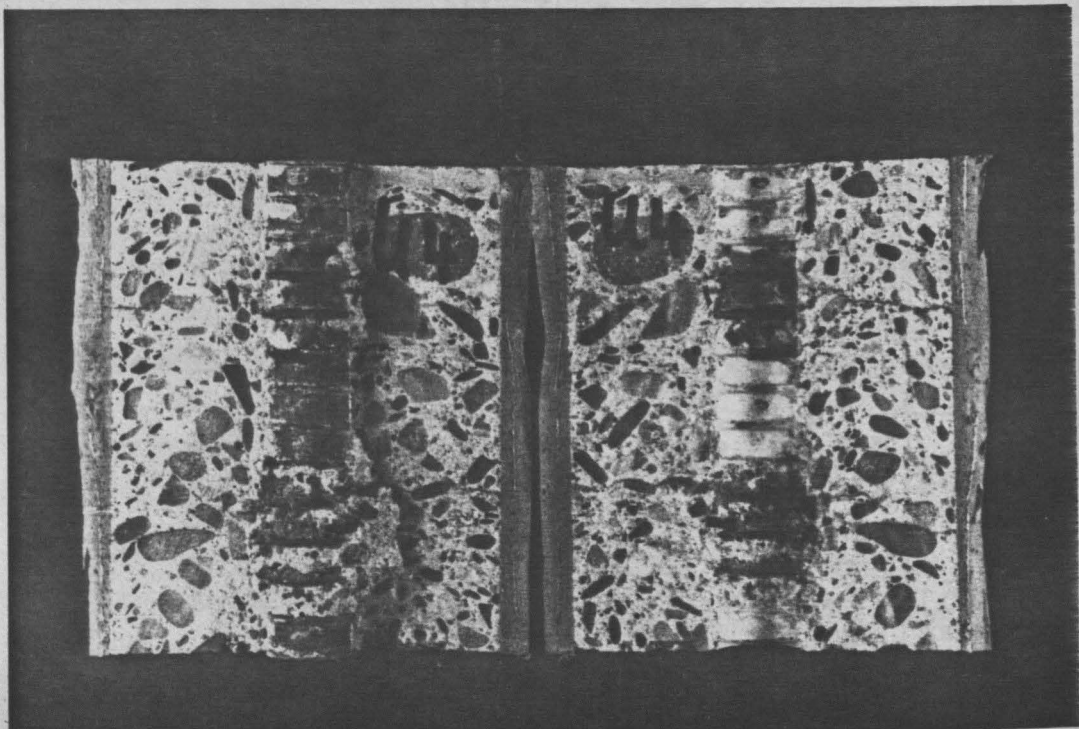
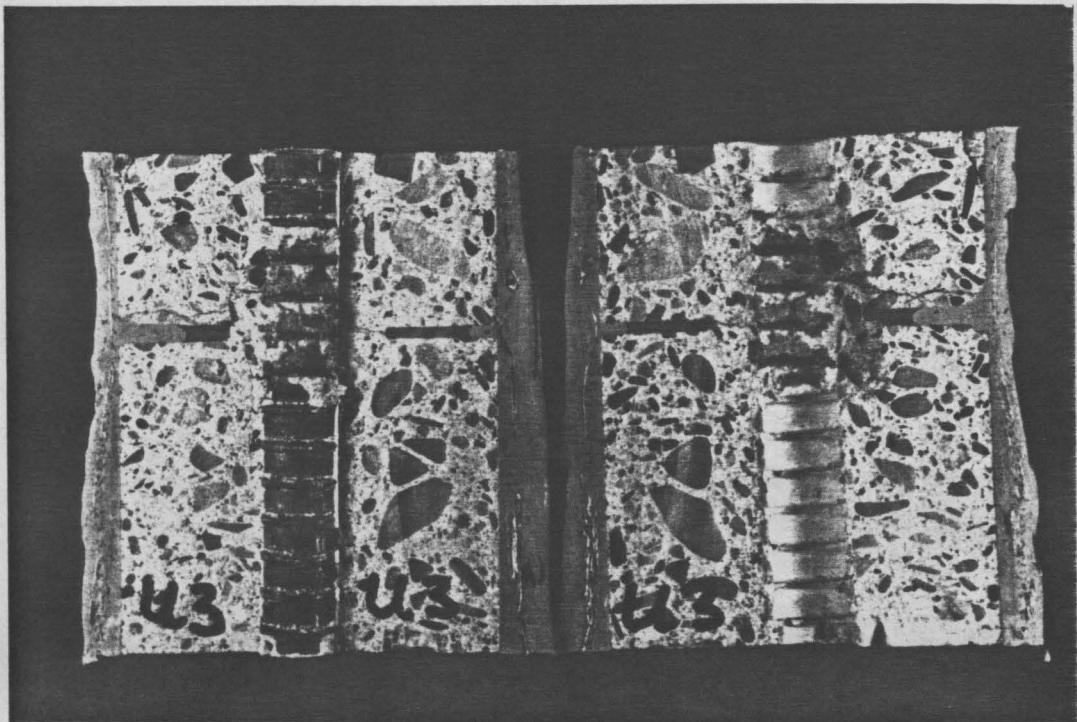


 Verfärbung durch Kunstharz

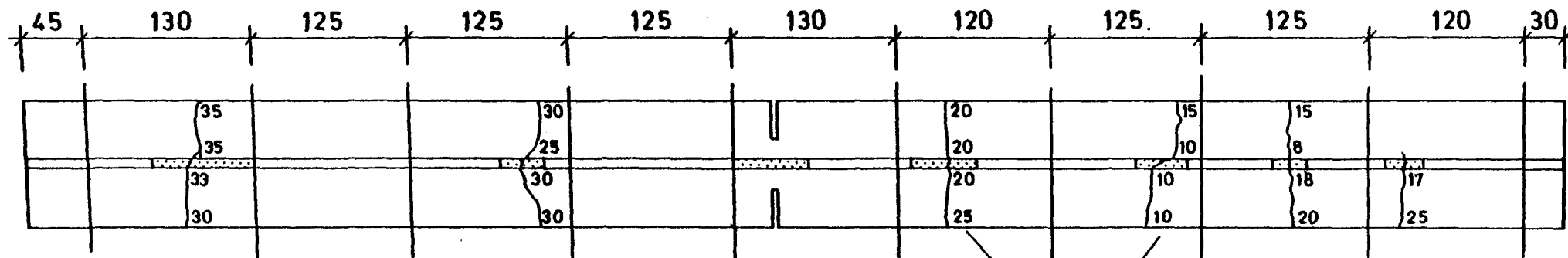
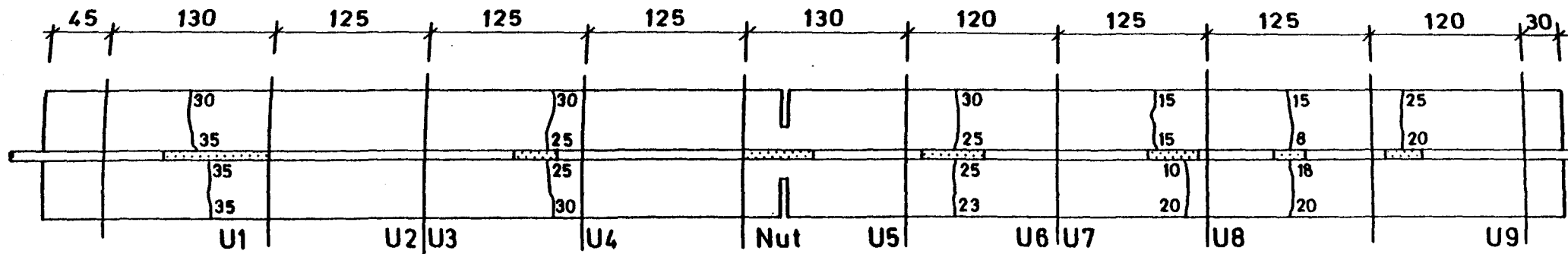
Rißbreite in Teilstrichen
1 Teilstrich \approx 0,01 mm

Abschnitte U3 und U4 siehe Photos Anlage 26

Dehnkörper DK 7: Inneres Rißbild



Inneres Rißbild im Mittelbereich des Dehnkörpers DK 7
vergleiche Anlage 25

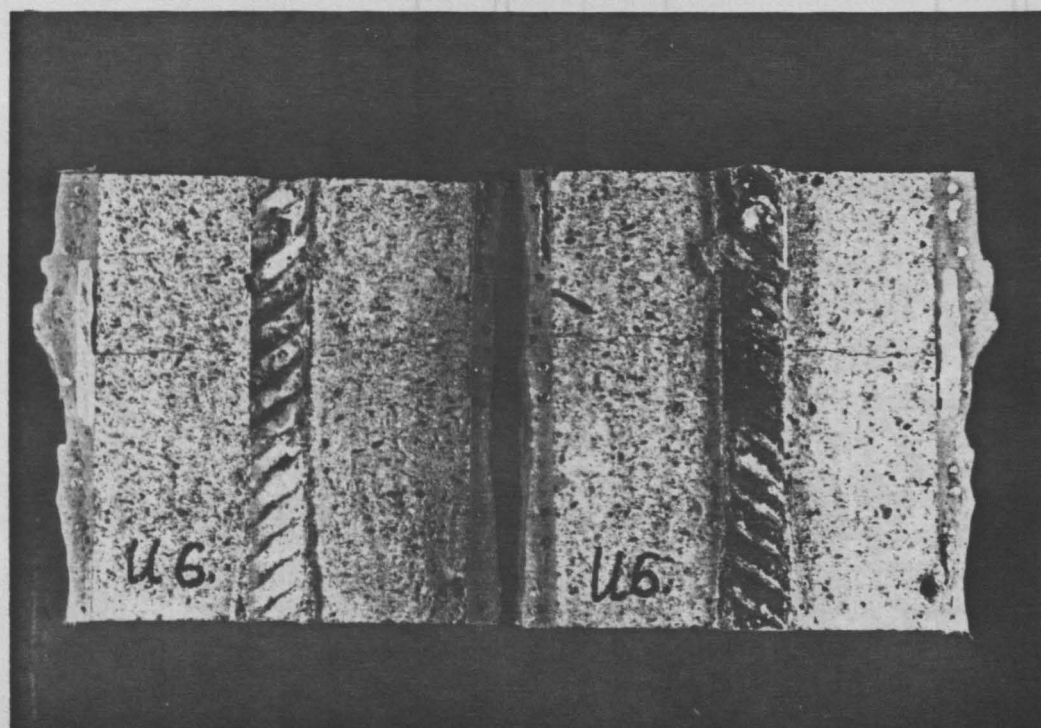
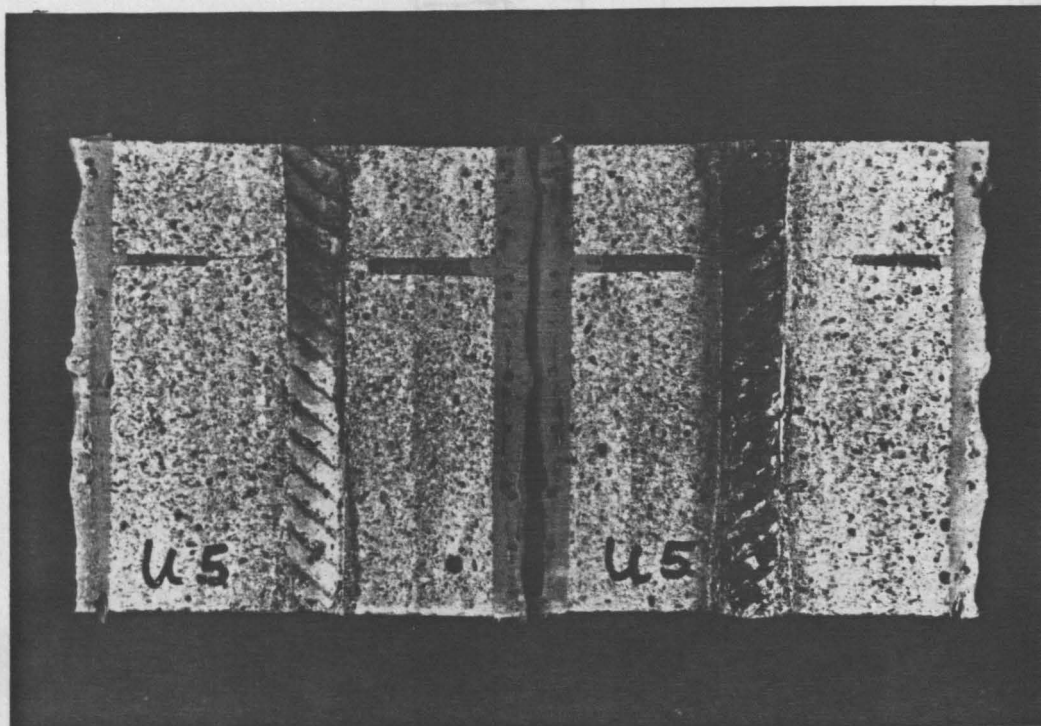


Rißbreite in Teilstrichen
1 Teilstrich $\approx 0,01\text{mm}$

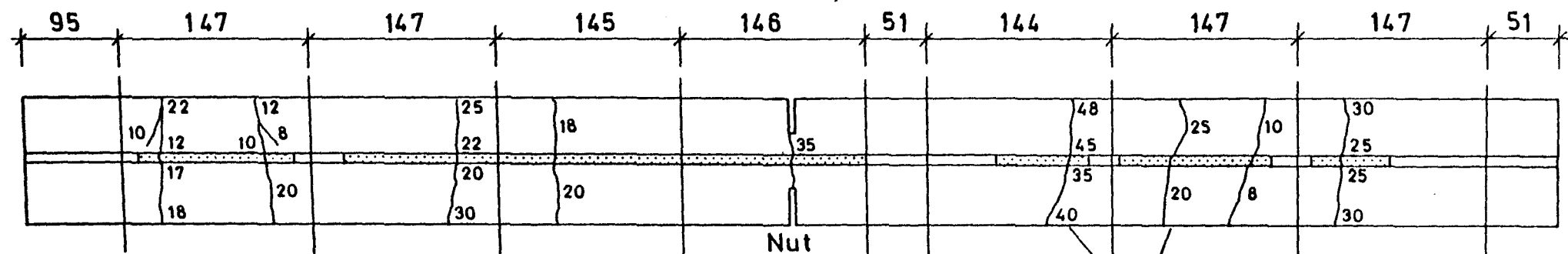
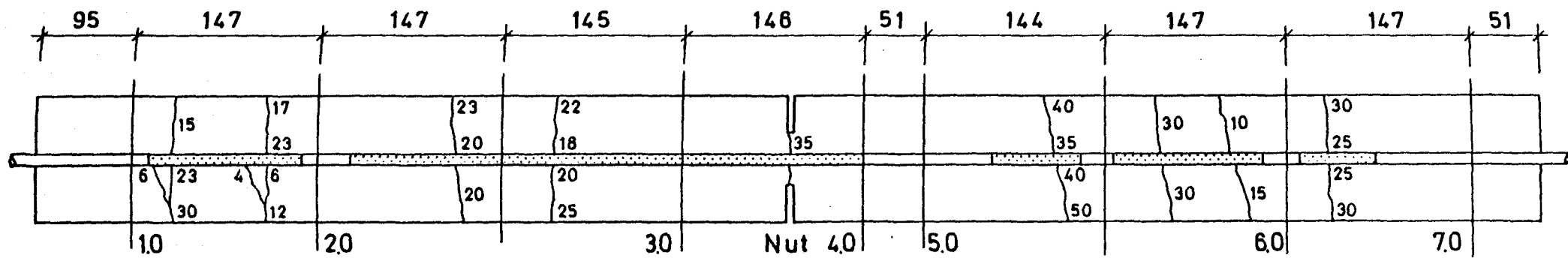
Verfärbung durch
Kunstharz

Abschnitte U5 und U8 siehe Photos Anlage 28

Dehnkörper MK 1: Inneres Rißbild



Inneres Rißbild im unteren Teil des Dehnkörpers MK 1
vergleiche Anlage 27

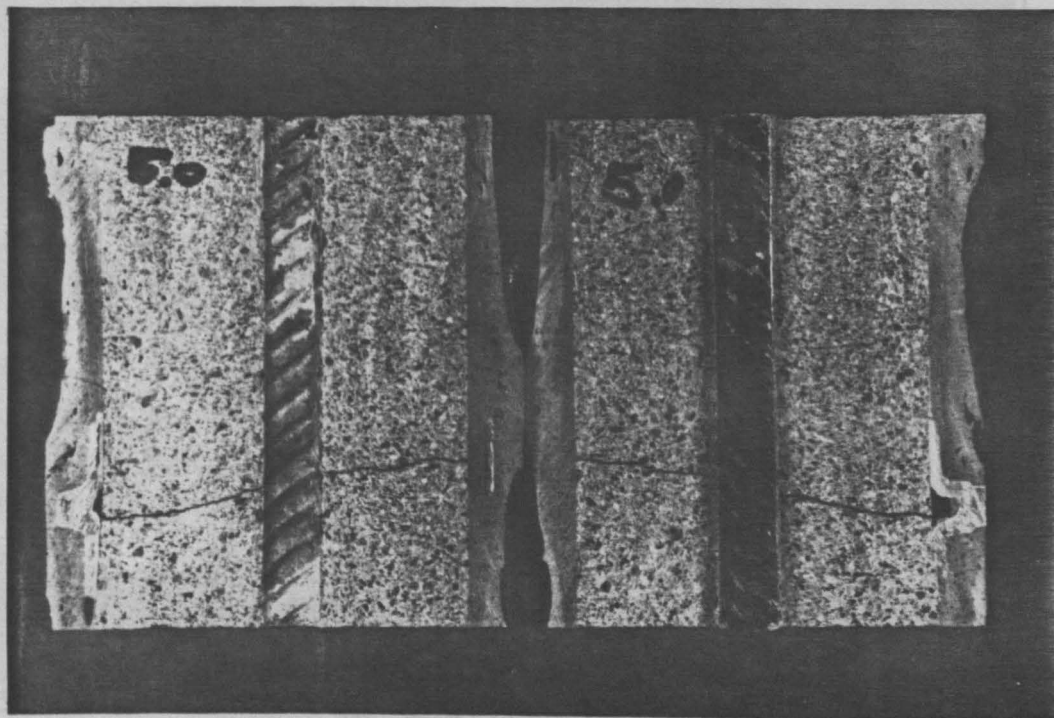
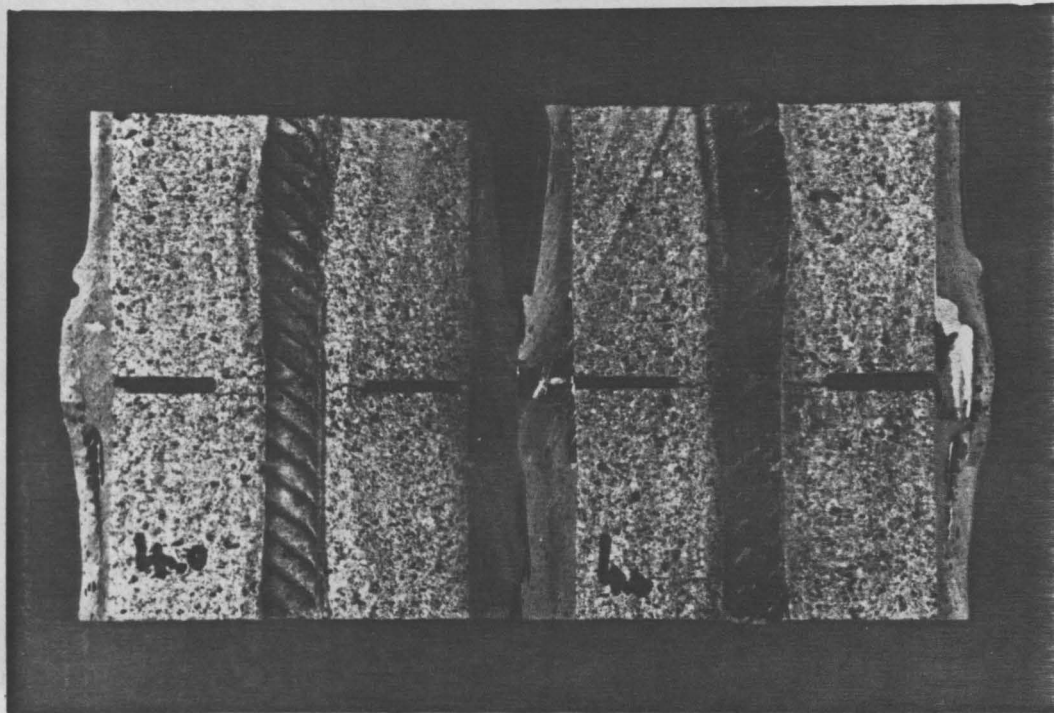


Rißbreite in Teilstrichen
1 Teilstrich \approx 0,01 mm

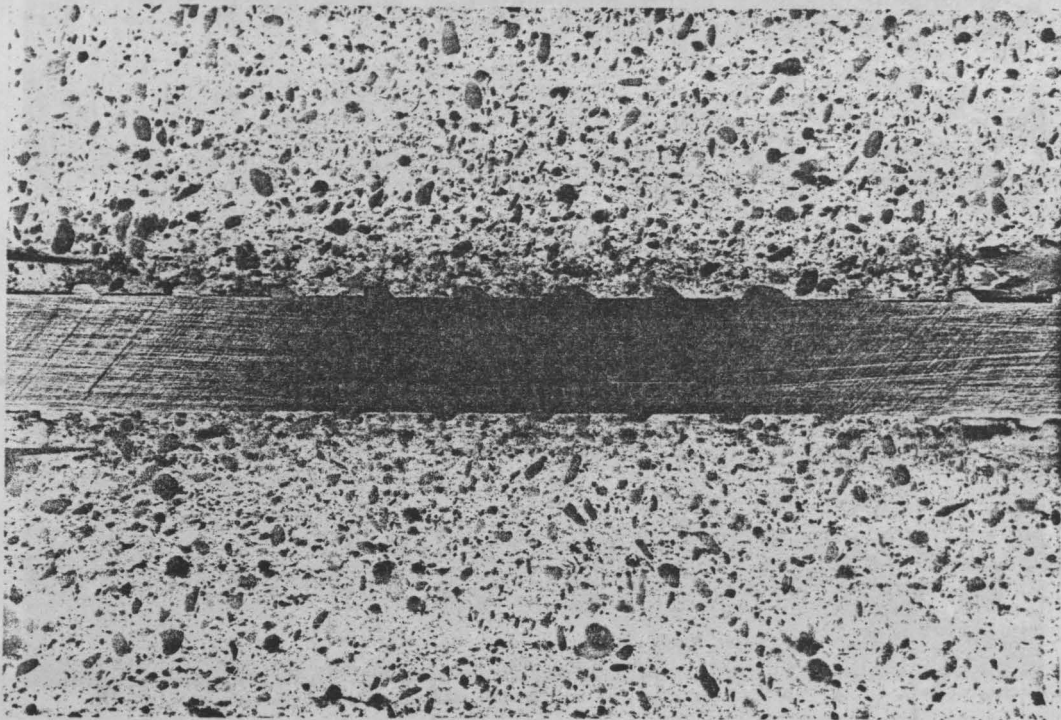
 Verfärbung durch
Kunstharz

Abschnitte 4.0 und 5.0 siehe Photos Anlage 30

Dehnkörper MK 2: Inneres Rißbild

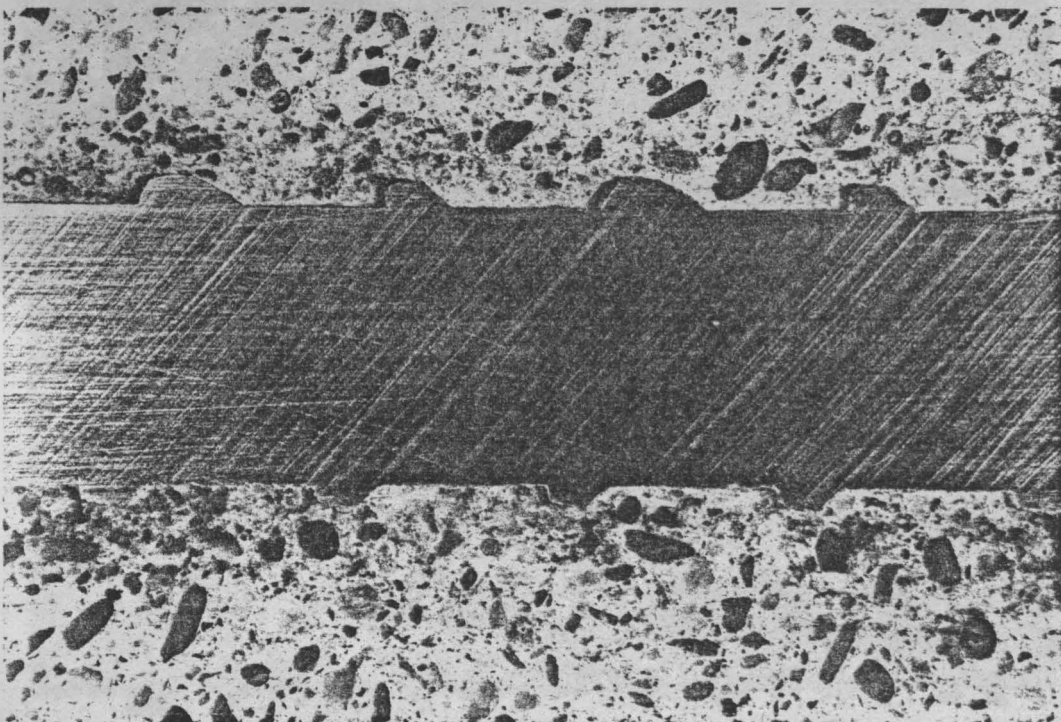


Inneres Rißbild im mittleren Teil des Dehnkörpers MK 2
vergleiche Anlage 29

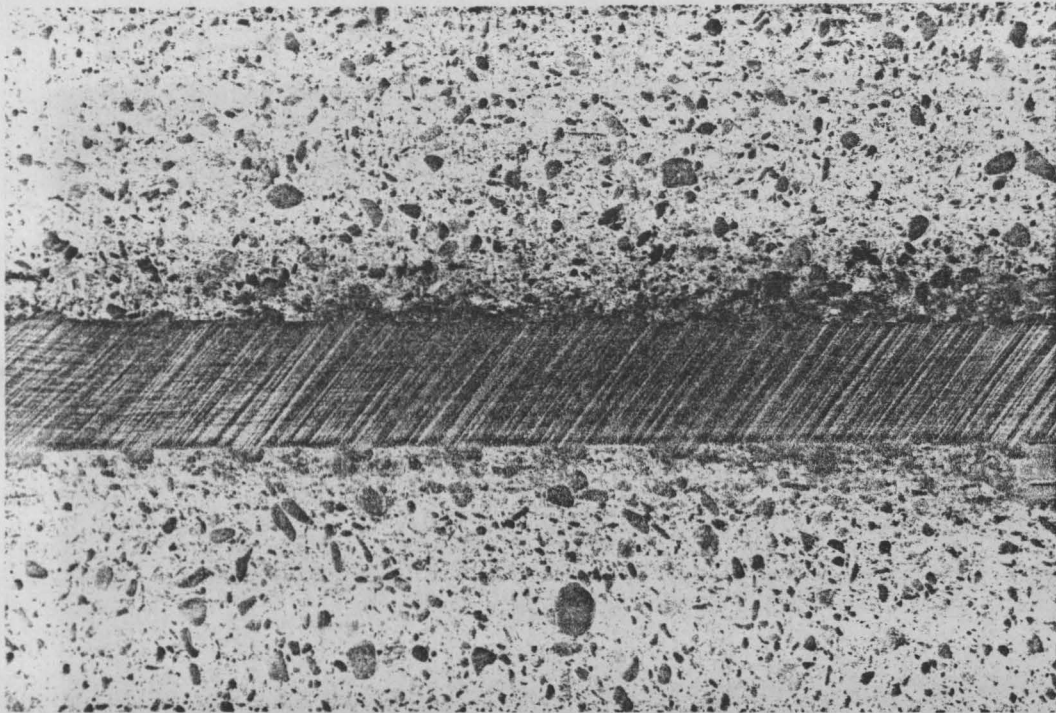


Ausschnitt siehe unten

Inneres Rißbild im Verbundbereich, Ausziehkörper AKE5.8



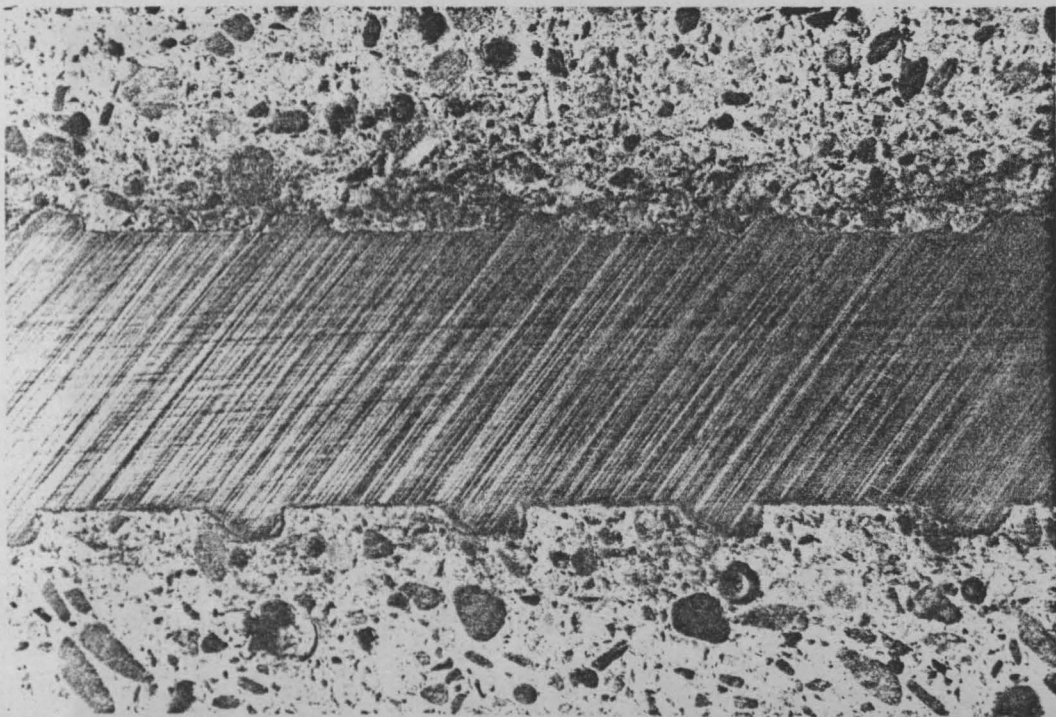
Vergrößerter Ausschnitt aus obigem Rißbild



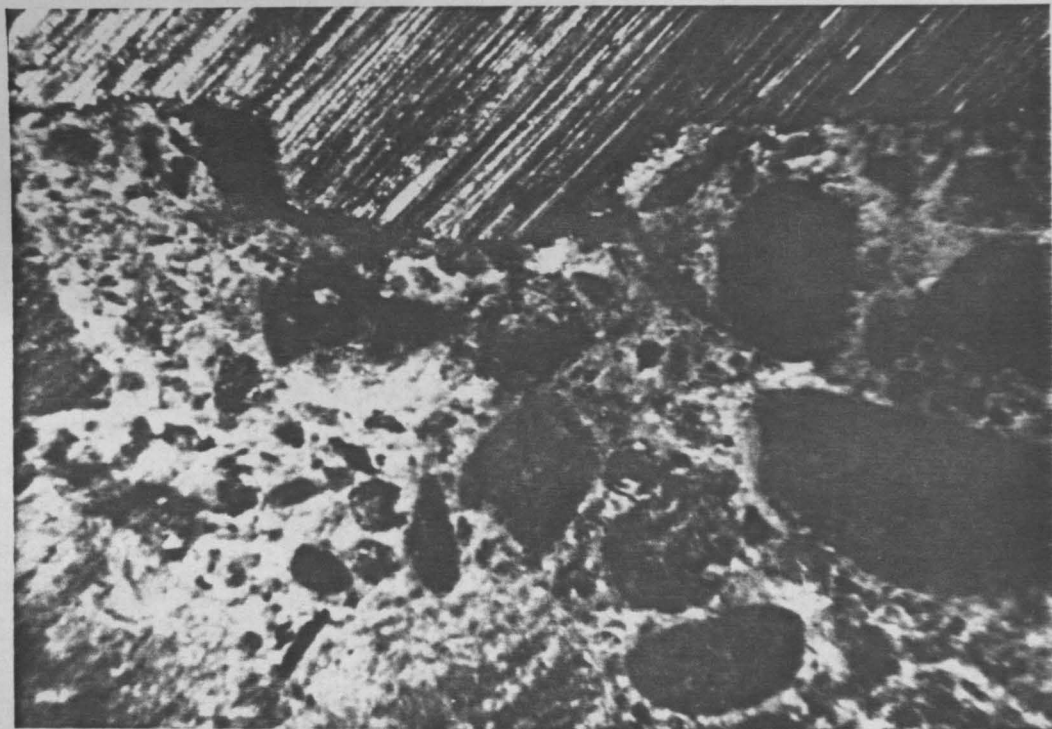
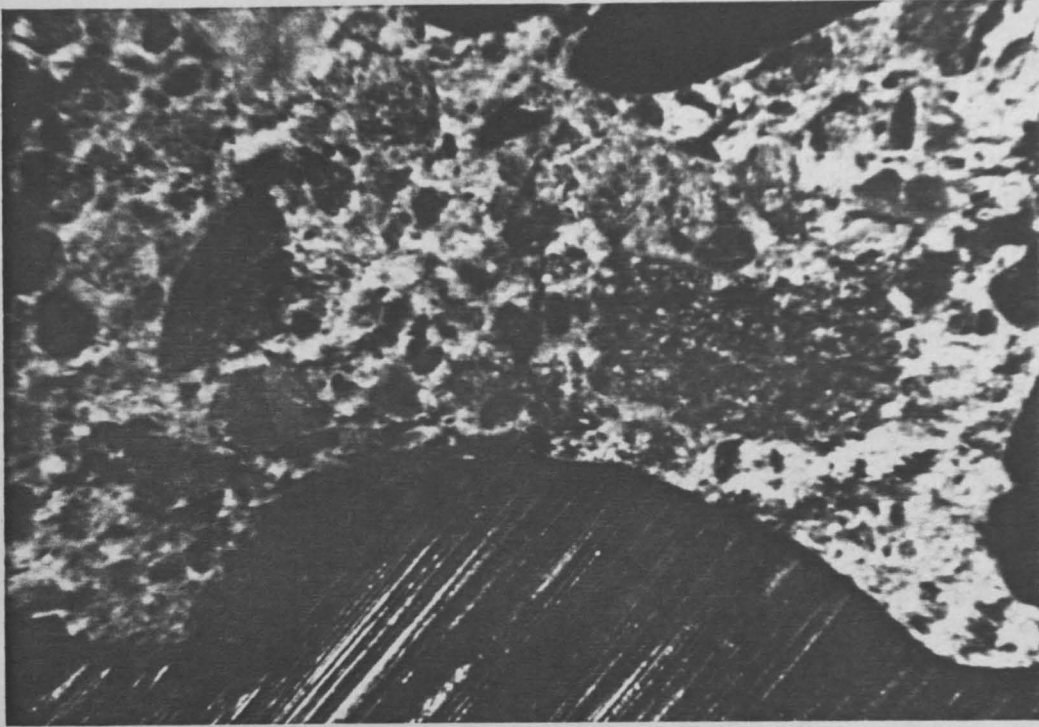
→ F

↑
Ausschnitt siehe unten
↑

Inneres Rißbild im Verbundbereich, Ausziehkörper AKE5.9



Vergrößerter Ausschnitt aus obigem Rißbild



1:6 fache Vergrößerung von Verbundrissen, Ausziehkörper AKE5.8